

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

ESTUDIO DE LA SOLDABILIDAD Y RESISTENCIA MECÁNICA DE LOS ALUMINIOS ESTRUCTURALES AA6063 y AA6061 TRATADOS TÉRMICAMENTE POR PROCESO DE ENVEJECIMIENTO, Y SOLDADOS MEDIANTE PROCESO DE SOLDADURA GMAW

PROYECTO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO MECÁNICO

SHARON SAMANTHA ABARCA GUERRERO

shasa_abarca@hotmail.com

DIEGO ROBERTO MARCHÁN VALLEJO

diegormarchanv@gmail.com

Director: Ing. Diego Marcelo Espinosa Chauvín

espinosadie@gmail.com

Co-director: Ing. Carlos Wime Díaz Campoverde

carlos.diaz@epn.edu.ec

2016

DECLARACIÓN

Nosotros, Sharon Samantha Abarca Guerrero y Diego Roberto Marchán Vallejo, declaramos bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de nuestra autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que hemos consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

La Escuela Politécnica Nacional puede hacer uso de los derechos correspondientes a este trabajo, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normatividad institucional vigente.

Sharon Samantha Abarca Guerrero

Diego Roberto Marchán Vallejo

CERTIFICACIÓN

Certificamos que el presente trabajo fue desarrollado por Sharon Samantha Abarca Guerrero y Diego Roberto Marchán Vallejo, bajo nuestra supervisión.

Ing. Diego Espinosa

DIRECTOR

Ing. Carlos Díaz

CO-DIRECTOR

AGRADECIMIENTOS

A nuestras familias, por la incondicional ayuda y apoyo en los momentos más difíciles de la realización de este proyecto, sus palabras de aliento y motivación que nos llenaban de valor para seguir adelante.

A nuestro director y codirector de tesis, los ingenieros Diego Espinosa y Carlos Díaz, por su invaluable apoyo y asesoramiento para la realización de este proyecto, ya que sin su ayuda, experiencia y conocimientos no se podría haber culminado este sueño.

A los ingenieros William Monar, Mauricio Cely, Verónica Sotomayor, Gabriel Velastegui, entre otros, que nos orientaron en determinadas fases del desarrollo de este proyecto, además de brindarnos sugerencias y ayuda en la realización de varios ensayos.

A la Facultad de Ingeniería Mecánica, que nos brindó las herramientas y conocimientos durante toda nuestra carrera para llegar a este momento.

A todo el personal de los laboratorios que fueron usados para la realización de este trabajo, por su guía, ayuda y pronta respuesta a nuestros requerimientos.

A nuestros amigos, que estuvieron presentes en momentos difíciles brindándonos ayuda y ánimos.

Agradecemos a las empresas Serpra Cia. Ltda. Y Cedal S.A. por abrirnos sus puertas y apoyarnos en la realización de este proyecto.

Sharon Abarca; Diego Marchán

DEDICATORIA

A mis hermanos, Nastia y Ralf, porque nunca hubiera tenido el valor de rendirme sabiendo que siguen mis pasos. Han sido mi motor y mi fuerza para seguir adelante.

A mis padres, Astrid y John, por su apoyo y compañía en las largas noches de desvelo, y por la fuerza y aliento que me dan cuando me siento derrotada. Este logro es por y para ustedes.

A mi abuelo Arcecio (+), porque sé cuánto deseaba acompañarme en este sueño, pero la vida no le alcanzó. Y a mi abuela Enma, por su apoyo incondicional.

Sharon Abarca

A mis padres, gracias por todo su apoyo, amor, ayuda y comprensión en todos los momentos felices y difíciles que viví durante mis estudios y a lo largo de la realización de este proyecto, ustedes son mi guía y ejemplo.

A toda mi familia, primos, tíos, abuelos por ayudarme y darme aliento durante esta fase de mi vida.

Diego Marchán

ÍNDICE DE CONTENIDO

| | |
|------------------------|-----|
| LISTA DE FIGURAS | i |
| LISTA DE TABLAS | ii |
| LISTA DE ANEXOS | iii |
| RESUMEN | iv |
| ABSTRACT | v |

CAPÍTULO 1

| | |
|--|----------|
| INTRODUCCIÓN | 1 |
| 1.1 RESEÑA HISTÓRICA | 1 |
| 1.2 GENERALIDADES | 2 |
| 1.2.1 Resistencia mecánica y características del aluminio | 3 |
| 1.3 CLASIFICACIÓN DE LAS ALEACIONES | 4 |
| 1.4 NOMENCLATURA Y SIMBOLOGÍA DE LAS ALEACIONES | 7 |
| 1.5 SISTEMA DE DESIGNACIÓN DE LA ALEACIÓN | 7 |
| 1.5.1 Designación para aleaciones de aluminio en bruto | 8 |
| 1.5.2 Designación para aleaciones de aluminio fundidas | 8 |
| 1.6 ALUMINIOS ESTRUCTURALES | 10 |
| 1.7 CARACTERÍSTICAS DE LAS ALEACIONES DE ALUMINIO FORJADAS | 11 |
| 1.8 APLICACIONES Y USOS DEL ALUMINIO EN EL PAÍS | 12 |

CAPÍTULO 2

| | |
|---|-----------|
| ALUMINIOS ESTRUCTURALES AA6061 Y AA6063 | 14 |
| 2.1 PROPIEDADES DE LOS ALUMINIOS AA6061 Y AA6063 | 14 |
| 2.1.1 Resistencia mecánica | 16 |
| 2.1.2 Soldabilidad | 18 |
| 2.1.2.1 Normas para soldadura de las aleaciones de aluminio AA6061 y AA6063 | 18 |
| 2.1.2.2 Ensayos de soldabilidad | 20 |

| | | |
|-----------|---|----|
| 2.1.2.2.1 | Ensayo de parche circular | 20 |
| 2.1.2.2.2 | Ensayo Batelle..... | 21 |
| 2.1.2.2.3 | Ensayo Varestraint..... | 22 |
| 2.1.2.2.4 | Ensayo Trans-Varestraint..... | 23 |
| 2.1.2.2.5 | Ensayo Houldcroft | 24 |
| 2.1.2.2.6 | Ensayo Finger test..... | 26 |
| 2.1.2.2.7 | Ensayo de pelado y desgarre..... | 26 |
| 2.2 | EMPRESAS DE PRODUCCIÓN NACIONAL DE ALUMINIO ESTRUCTURAL AA6061 Y AA6063 | 27 |

CAPÍTULO 3

TRATAMIENTO TÉRMICO POR ENVEJECIMIENTO..... 29

| | | |
|-------|---|----|
| 3.1 | TRATAMIENTOS TÉRMICOS PARA EL ALUMINIO | 29 |
| 3.1.1 | Recocido | 29 |
| 3.1.2 | Temple..... | 30 |
| 3.1.3 | Envejecimiento artificial..... | 32 |
| 3.1.4 | Revenido..... | 33 |
| 3.2 | ENVEJECIMIENTO EN EL ALUMINIO AA6063 Y AA6061 | 33 |
| 3.2.1 | Descripción del proceso..... | 34 |

CAPÍTULO 4

PROCESO DE SOLDADURA GMAW 36

| | | |
|---------|---|----|
| 4.1 | GENERALIDADES DEL PROCESO | 36 |
| 4.2 | DESCRIPCIÓN DE PROCESOS GMAW – MIG/MAG | 38 |
| 4.3 | TIPOS DE TRANSFERENCIA | 39 |
| 4.4 | VENTAJAS Y DESVENTAJAS DEL PROCESO..... | 41 |
| 4.5 | APLICACIÓN DEL PROCESO GMAW-MIG A LA SOLDADURA DE ALUMINIOS AA6063 Y AA6061 | 42 |
| 4.5.1 | Soldabilidad del aluminio AA6063 y AA6061 | 44 |
| 4.5.1.1 | Soldadura en juntas a tope | 44 |
| 4.6 | PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA GMAW-MIG | 46 |
| 4.6.1 | Equipo..... | 47 |
| 4.6.2 | Parámetros de soldadura..... | 48 |
| 4.6.2.1 | Diámetro, composición, velocidad de alimentación y extensión libre del electrodo..... | 49 |

| | | |
|---------|--|----|
| 4.6.2.2 | Voltaje y longitud del arco..... | 52 |
| 4.6.2.3 | Amperaje..... | 53 |
| 4.6.2.4 | Polaridad..... | 54 |
| 4.6.2.5 | Gas de protección..... | 54 |
| 4.6.2.6 | Ángulo de incidencia de la pistola y dirección de soldadura..... | 55 |
| 4.6.3 | Especificación del procedimiento de soldadura..... | 57 |

CAPÍTULO 5

| | |
|----------------------------------|---|
| PRUEBA EXPERIMENTAL | 59 |
| 5.1 | DESCRIPCIÓN DE MATERIA PRIMA..... 59 |
| 5.1.1 | Descripción de materia prima de aluminio AA6061..... 59 |
| 5.1.1.1 | Ensayo de espectrometría por chispa para aleación AA6061..... 62 |
| 5.1.2 | Descripción de materia prima de aluminio AA6063..... 62 |
| 5.1.2.1 | Ensayo de espectrometría por chispa para aleación AA6063..... 63 |
| 5.2 | DESCRIPCIÓN DEL MATERIAL DE APORTE..... 64 |
| 5.3 | DESCRIPCIÓN DEL GAS DE PROTECCIÓN..... 66 |
| 5.4 | PROCESO DE TRATAMIENTO TÉRMICO POR ENVEJECIMIENTO ARTIFICIAL A LOS ALUMINIOS AA6063 Y AA6061..... 67 |
| 5.5 | ESPECIFICACIONES DEL PROCESO DE SOLDADURA (WPS) PARA LA SOLDADURA DE JUNTAS DE ALUMINIO AA6061, AA6063 Y MIXTAS..... 71 |
| 5.6 | SOLDADURA DE ALEACIONES AA6061 Y AA6063..... 76 |
| 5.7 | MAQUINADO Y PREPARACIÓN DE PROBETAS..... 78 |
| 5.8 | ANÁLISIS DE RESISTENCIA MECÁNICA DE LOS ALUMINIOS AA6063 Y AA6061..... 81 |
| 5.8.1 | Ensayo de tracción..... 82 |
| 5.8.2 | Ensayo de dureza..... 91 |
| 5.9 | ANÁLISIS DE LA SOLDABILIDAD DE LOS ALUMINIOS AA6063 Y AA6061..... 94 |
| 5.9.1 | Ensayo de soldabilidad houldcroft..... 94 |
| 5.9.2 | Ensayo de doblado de cara y raíz de junta soldada..... 102 |
| 5.10 | INSPECCIÓN METALOGRÁFICA..... 109 |
| 5.11 | ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS PARA CALIFICACIÓN DE SOLDADURA..... 114 |
| 5.11.1 | Inspección visual..... 114 |

| | | |
|--------|--|-----|
| 5.11.2 | Inspección por tintas penetrantes..... | 116 |
|--------|--|-----|

CAPÍTULO 6

| | |
|--------------------------------------|------------|
| RESULTADOS Y DISCUSIONES..... | 118 |
|--------------------------------------|------------|

| | | |
|-----|--|-----|
| 6.1 | ANÁLISIS DE LA RESISTENCIA MECÁNICA Y SOLDABILIDAD DEL ALUMINIO AA6063 | 118 |
|-----|--|-----|

| | | |
|-------|--|-----|
| 6.1.1 | Comparación de la resistencia mecánica del aluminio AA6063 antes y después de la aplicación del tratamiento térmico por envejecimiento | 118 |
|-------|--|-----|

| | | |
|-------|---|-----|
| 6.1.2 | Comparación de la soldabilidad del aluminio AA6063 antes y después de la aplicación del tratamiento térmico por envejecimiento..... | 122 |
|-------|---|-----|

| | | |
|-----|--|-----|
| 6.2 | ANÁLISIS DE LA RESISTENCIA MECÁNICA Y SOLDABILIDAD DEL ALUMINIO AA6061 | 124 |
|-----|--|-----|

| | | |
|-------|--|-----|
| 6.2.1 | Comparación de la resistencia mecánica del aluminio AA6061 antes y después de la aplicación del tratamiento térmico por envejecimiento | 124 |
|-------|--|-----|

| | | |
|-----|---|-----|
| 6.3 | ANÁLISIS DE LA RESISTENCIA MECÁNICA Y SOLDABILIDAD DE JUNTAS SOLDADAS MIXTAS DE ALUMINIOS AA6061 Y AA6063. | 130 |
|-----|---|-----|

| | | |
|-------|---|-----|
| 6.3.1 | Comparación de la soldabilidad de juntas soldadas mixtas de aluminios AA6061 y AA6063 antes y después de la aplicación del tratamiento térmico por envejecimiento | 132 |
|-------|---|-----|

| | | |
|-----|---|-----|
| 6.4 | ANÁLISIS METALOGRAFÍCO DE LAS ALEACIONES AA6061 Y AA6063..... | 132 |
|-----|---|-----|

| | | |
|-------|--|-----|
| 6.4.1 | Análisis metalográfico de la aleación AA6063 | 133 |
|-------|--|-----|

| | | |
|---------|--------------------------------|-----|
| 6.4.1.1 | Macrografías de AA6063-F | 133 |
|---------|--------------------------------|-----|

| | | |
|---------|--------------------------------|-----|
| 6.4.1.2 | Macrografías de AA6063-TT..... | 135 |
|---------|--------------------------------|-----|

| | | |
|---------|-------------------------------|-----|
| 6.4.1.3 | Micrografías de AA6063-F..... | 136 |
|---------|-------------------------------|-----|

| | | |
|---------|---------------------------------|-----|
| 6.4.1.4 | Micrografías de AA6063-TT | 138 |
|---------|---------------------------------|-----|

| | | |
|-------|--|-----|
| 6.4.2 | Análisis metalográfico de la aleación AA6061 | 139 |
|-------|--|-----|

| | | |
|---------|--------------------------------|-----|
| 6.4.2.1 | Macrografías de AA6061-F | 140 |
|---------|--------------------------------|-----|

| | | |
|---------|--------------------------------|-----|
| 6.4.2.2 | Macrografías de AA6061-TT..... | 141 |
|---------|--------------------------------|-----|

| | | |
|---------|-------------------------------|-----|
| 6.4.2.3 | Micrografías de AA6061-F..... | 143 |
|---------|-------------------------------|-----|

| | | |
|---------|---------------------------------|-----|
| 6.4.2.4 | Micrografías de AA6061-TT | 144 |
|---------|---------------------------------|-----|

| | | |
|-----|---|-----|
| 6.5 | CALIFICACIÓN DEL PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA (PQR) | 147 |
|-----|---|-----|

CAPÍTULO 7

| | |
|---|------------|
| CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES | 151 |
|---|------------|

| | | |
|-----|-------------------|-----|
| 7.1 | CONCLUSIONES..... | 151 |
|-----|-------------------|-----|

| | | |
|-----|-------------------------|------------|
| 7.2 | RECOMENDACIONES | 153 |
| | REFERENCIAS..... | 155 |
| | ANEXOS..... | 160 |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1.1 - Nomenclatura y grupos de las aleaciones de aluminio | 9 |
| Figura 2.1- Esquema del ensayo de parche circular | 21 |
| Figura 2.2 – Esquema del ensayo Battelle..... | 21 |
| Figura 2.3 – Esquema del ensayo Varestraint | 23 |
| Figura 2.4 – Esquema del ensayo Trans-Varestraint..... | 24 |
| Figura 2.5 – Esquema del ensayo Houldcroft..... | 25 |
| Figura 2.6 – Tipos de probetas para el ensayo Houldcroft ⁷ | 25 |
| Figura 2.7 – Esquema del ensayo Finger Test..... | 26 |
| Figura 2.8 – Esquema del ensayo de pelado y desgarre | 27 |
| Figura 3.1 - Diagrama de fase para aleación de aluminio y proceso de envejecimiento.... | 35 |
| Figura 4.1 – Esquema del proceso GMAW..... | 36 |
| Figura 4.2 – Esquema de las partes del equipo semiautomático GMAW | 38 |
| Figura 4.3 – Transferencia de tipo globular | 40 |
| Figura 4.4 – Transferencia de tipo spray | 40 |
| Figura 4.5 – Tipos de biseles para soldadura..... | 45 |
| Figura 4.6 – Bisel en V para juntas de espesor superior a 3mm..... | 46 |
| Figura 4.7 – Equipo de soldadura GMAW-MIG, CEBORA ® Evo 200M | 48 |
| Figura 4.8 – Parámetros de forma del cordón de soldadura | 49 |
| Figura 4.9 – Recomendaciones de la AWS para la selección del electrodo de acuerdo al metal base | 50 |
| Figura 4.10 – Cambio de forma del cordón con aumento de la velocidad de alimentación | 51 |
| Figura 4.11 – Cambio de forma del cordón con un aumento de velocidad de avance | 51 |
| Figura 4.12 – Cambio de forma del cordón con un aumento de voltaje..... | 53 |
| Figura 4.13 – Tipos de dirección de soldadura e inclinación de la torcha | 55 |
| Figura 4.14 – Cambio de forma del cordón con aumento de los ángulos de empuje o arrastre | 56 |
| Figura 4.15 – Formato estándar de un WPS..... | 58 |
| Figura 5.1 - Esquema perfil en ángulo de lados iguales en aleación AA6061 | 60 |

| | |
|--|----|
| Figura 5.2 – Perfil en ángulo de lados iguales en aleación AA6061 | 60 |
| Figura 5.3 – Esquema viga en I, aleación AA6061 | 61 |
| Figura 5.4 – Perfil aleación AA6061, espesor 1.4 mm..... | 61 |
| Figura 5.5 – Perfil en forma de tubo rectangular de aleación AA6063 | 62 |
| Figura 5.6 Esquema tubo rectangular de aleación 6063..... | 63 |
| Figura 5.7 – Guía para selección de material de aporte en función del metal base..... | 64 |
| Figura 5.8 – Presentación comercial del electrodo ER4043, marca Aufhauser, diámetro 0.9mm..... | 65 |
| Figura 5.9 – Tanque de argón al 100% de 7 metros cúbicos..... | 66 |
| Figura 5.10 – Evolución esquemática de la dureza y resistencia de una aleación de aluminio estructural con endurecimiento | 68 |
| Figura 5.11 – Horno tipo mufla, marca Vulcan 3-550, Laboratorio de Tratamientos Térmicos, EPN..... | 69 |
| Figura 5.12 – Configuración de tiempo de tratamiento y temperatura..... | 70 |
| Figura 5.13 – Probetas antes de ser colocadas en el horno de tratamiento..... | 70 |
| Figura 5.14 – Colocación de las probetas para el tratamiento térmico..... | 70 |
| Figura 5.15 – Bisel a 45° en AA6061..... | 76 |
| Figura 5.16 – Cordón de soldadura | 77 |
| Figura 5.17 – Limpieza del cordón con cepillo de acero..... | 77 |
| Figura 5.18 – Preparación de las probetas..... | 78 |
| Figura 5.19 – Especificaciones de ASME código IX para probetas de doblado de cara y raíz | 79 |
| Figura 5.20 – Probeta para ensayo de doblado de cara, antes de realizar el maquinado del cordón | 79 |
| Figura 5.21 – Dimensiones de las probetas Houldcroft..... | 80 |
| Figura 5.22 – Probetas de AA6061 preparadas para el ensayo Houldcroft..... | 80 |
| Figura 5.23 – Bisel de probeta Houldcroft de aleación AA6061 | 81 |
| Figura 5.24 – Dimensiones de la probeta de tracción..... | 82 |
| Figura 5.25 – Modelo de una probeta de tracción con junta soldada | 83 |
| Figura 5.26 – Máquina universal de ensayos del Laboratorio de Análisis de Esfuerzos y Vibraciones, EPN | 83 |
| Figura 5.27 – Colocación de las probetas en la máquina universal de ensayos | 84 |

| | |
|---|----|
| Figura 5.28 – Probeta con junta soldada al momento de presentar la falla | 84 |
| Figura 5.29 - Probeta de AA6061 sin TT | 85 |
| Figura 5.30 - Fractura en probeta de AA6061 sin TT | 85 |
| Figura 5.31 - Probeta de AA6061 con TT | 85 |
| Figura 5.32 - Fractura en probeta de AA6061 con TT | 85 |
| Figura 5.33 - Probeta de AA6061, junta soldada, con TT | 85 |
| Figura 5.34 - Fractura en probeta de AA6061, junta soldada, con TT | 85 |
| Figura 5.35 - Probeta de AA6061, junta soldada, sin TT | 86 |
| Figura 5.36 - Fractura en probeta de AA6061, junta soldada, sin TT | 86 |
| Figura 5.37 - Probeta de AA6063 sin TT | 86 |
| Figura 5.38 - Fractura en probeta de AA6063 sin TT | 86 |
| Figura 5.39 - Probeta de AA6063 con TT | 86 |
| Figura 5.40 - Fractura en probeta de AA6063 con TT | 86 |
| Figura 5.41 - Probeta de AA6063, junta soldada, sin TT | 87 |
| Figura 5.42 - Fractura en probeta de AA6063, junta soldada, sin TT | 87 |
| Figura 5.43 - Probeta de AA6063, junta soldada, con TT | 87 |
| Figura 5.44 - Fractura en probeta de AA6063, junta soldada, con TT | 87 |
| Figura 5.45 - Probeta mixta de AA6063 y AA6061, junta soldada, sin TT | 87 |
| Figura 5.46 - Fractura en probeta mixta de AA6063 y AA6061, junta soldada, sin TT | 87 |
| Figura 5.47 - Probeta mixta de AA6063 y AA6061, junta soldada, con TT | 88 |
| Figura 5.48 - Fractura en probeta mixta de AA6063 y AA6061, junta soldada, sin TT | 88 |
| Figura 5.49 - Probeta de AA6061 sin TT | 88 |
| Figura 5.50 - Fractura en probeta de AA6061 sin TT | 88 |
| Figura 5.51 - Probeta de AA6061 con TT | 89 |
| Figura 5.52 - Fractura en probeta de AA6061 con TT | 89 |
| Figura 5.53 – Resultados para probeta 1 de material AA6061 en menor espesor | 89 |
| Figura 5.54 – Resultados para probeta 2 de material AA6061 en menor espesor | 89 |
| Figura 5.55 - Probeta de AA6061 con recocido | 90 |
| Figura 5.56 - Fractura en probeta de AA6061 con recocido | 90 |
| Figura 5.57 – Carga máxima en probeta AA6061 con recocido | 90 |
| Figura 5.58 – Durómetro Rockwell, marca Hardrocker, modelo HR150A | 91 |
| Figura 5.59 – Realización del ensayo de dureza a una probeta de aluminio AA6061 | 92 |

| | |
|--|-----|
| Figura 5.60 – Procedimiento de soldadura para el ensayo Houldcroft..... | 95 |
| Figura 5.61 – Preparación de las probetas..... | 97 |
| Figura 5.62 – Penetrante y revelador utilizados en el proceso..... | 98 |
| Figura 5.63 – Probetas con tinta penetrante durante el tiempo de reposo..... | 99 |
| Figura 5.64 – Aplicación del revelador..... | 99 |
| Figura 5.65 - Ensayo de tintas penetrantes en AA6061 sin TT..... | 100 |
| Figura 5.66 - Ensayo de tintas penetrantes en AA6061 con TT..... | 100 |
| Figura 5.67 - Ensayo de tintas penetrantes en AA6061 sin TT..... | 101 |
| Figura 5.68 - Ensayo de tintas penetrantes en AA6063 con TT..... | 101 |
| Figura 5.69 - Ensayo de tintas penetrantes en AA6063 y AA6061 sin TT..... | 101 |
| Figura 5.70 - Ensayo de tintas penetrantes en AA6063 y AA6061 con TT..... | 102 |
| Figura 5.71 - Probeta doblado de cara, vista superior..... | 103 |
| Figura 5.72 - Probeta doblado de cara, vista lateral..... | 103 |
| Figura 5.73 - Probeta doblado de raíz, vista superior..... | 103 |
| Figura 5.74 - Probeta doblado de raíz, vista lateral..... | 103 |
| Figura 5.75 - Probeta doblado de cara, vista superior..... | 104 |
| Figura 5.76 - Probeta doblado de cara, vista lateral..... | 104 |
| Figura 5.77 - Probeta doblado de raíz, vista superior..... | 104 |
| Figura 5.78 - Probeta doblado de raíz, vista lateral..... | 104 |
| Figura 5.79 - Probeta doblado de cara, vista superior..... | 104 |
| Figura 5.80 - Probeta doblado de cara, vista lateral..... | 104 |
| Figura 5.81 - Probeta doblado de raíz, vista superior..... | 105 |
| Figura 5.82 - Probeta doblado de raíz, vista lateral..... | 105 |
| Figura 5.83 - Probeta doblado de cara, vista superior..... | 105 |
| Figura 5.84 - Probeta doblado de cara, vista lateral..... | 105 |
| Figura 5.85 - Probeta doblado de raíz, vista superior..... | 105 |
| Figura 5.86 - Probeta doblado de raíz, vista lateral..... | 105 |
| Figura 5.87 - Probeta doblado de cara, vista superior..... | 106 |
| Figura 5.88 - Probeta doblado de cara, vista lateral..... | 106 |
| Figura 5.89 - Probeta doblado de raíz, vista superior..... | 106 |
| Figura 5.90 - Probeta doblado de raíz, vista lateral..... | 106 |
| Figura 5.91 - Probeta doblado de cara, vista superior..... | 106 |

| | |
|--|-----|
| Figura 5.92 - Probeta doblado de cara, vista lateral | 106 |
| Figura 5.93 - Probeta doblado de raíz, vista superior | 107 |
| Figura 5.94 - Probeta doblado de raíz, vista lateral | 107 |
| Figura 5.95 - Probeta doblado de cara, vista superior | 107 |
| Figura 5.96 - Probeta doblado de cara, vista lateral | 107 |
| Figura 5.97 - Probeta doblado de raíz, vista superior | 108 |
| Figura 5.98 - Probeta doblado de raíz, vista lateral | 108 |
| Figura 5.99 – Equipo de ensayo para doblado guiado..... | 108 |
| Figura 5.100 – Equipo de desbaste fino | 110 |
| Figura 5.101 – Recipiente de solución de alúmina de 0.3 micras | 111 |
| Figura 5.102 – Equipo de pulido | 111 |
| Figura 5.103 – Alcohol etílico al 99.8%..... | 112 |
| Figura 5.104 – Microscopio Olympus..... | 113 |
| Figura 5.105 – Discontinuidades en cordón de AA6061-F | 117 |
| Figura 5.106 – Discontinuidades en cordón de AA6063-F | 117 |
| Figura 5.107 – Discontinuidades en cordón de AA6063-TT | 117 |
| Figura 5.108 – Discontinuidades en cordón mixto-TT..... | 117 |
| Figura 6.1 – Comparación de resultados de ensayo de tracción en AA6063-F y AA6063-TT | 119 |
| Figura 6.2 – Comparación de resultados de ensayo de tracción en AA6063-F y AA6063-TT con junta soldada | 120 |
| Figura 6.3 – Comparación de resultados de ensayo de dureza en AA6063-F y AA6063-TT | 121 |
| Figura 6.4 – Resultados de ensayo de dureza en AA6063-F en junta soldada..... | 122 |
| Figura 6.5 – Comparación de resultados de ensayo de tracción en AA6061-F y AA6061-TT | 124 |
| Figura 6.6 – Comparación de resultados de ensayo de tracción en AA6061-F y AA6061-TT | 125 |
| Figura 6.7 – Comparación de resistencia mecánica de AA6061 en diferentes estados..... | 127 |
| Figura 6.8 – Comparación de resultados de ensayo de dureza en AA6061-F y AA6061-TT | 128 |
| Figura 6.9 – Resultados de ensayo de dureza en AA6061-F en junta soldada..... | 128 |

| | |
|---|-----|
| Figura 6.10 – Resultados de ensayo de dureza en AA6061-TT en junta soldada | 129 |
| Figura 6.11 – Comparación de resultados de ensayo de tracción en Mixto-F y Mixto-TT | 131 |
| Figura 6.12 – Macrografía de fractura en AA6063-F, vista lateral | 133 |
| Figura 6.13 – Macrografía de fractura en AA6063-F, vista superior | 134 |
| Figura 6.14 – Macrografía de fractura en AA6063-F, vista frontal | 134 |
| Figura 6.15 – Macrografía de fractura en AA6063-TT, vista lateral | 135 |
| Figura 6.16 – Macrografía de fractura en AA6063-TT, vista superior | 135 |
| Figura 6.17 – Macrografía de fractura en AA6063-TT, vista frontal..... | 136 |
| Figura 6.18 – Microestructura de AA6063-F | 136 |
| Figura 6.19 – Micrografías de AA6063-F, a 100X y 500X | 137 |
| Figura 6.20 – Micrografías de material de aporte ER4043, a 100X y 500X..... | 137 |
| Figura 6.21 – Microestructura del material de aporte ER4043 (obsérvese la parte superior de la imagen) | 138 |
| Figura 6.22 – Micrografías de AA6063-TT, a 100Xx y 500X..... | 138 |
| Figura 6.23 – Micrografías de material de aporte ER4043, a 100X y 500X..... | 139 |
| Figura 6.24 – Macrografía de fractura en AA6061-F, vista lateral | 140 |
| Figura 6.25 – Macrografía de fractura en AA6061-F, vista superior | 140 |
| Figura 6.26 – Macrografía de fractura en AA6061-F, vista frontal | 141 |
| Figura 6.27 – Macrografía de fractura en AA6061-TT, vista lateral | 141 |
| Figura 6.28 – Macrografía de fractura en AA6061-TT, vista superior | 142 |
| Figura 6.29 – Macrografía de fractura en AA6061-TT, vista frontal..... | 142 |
| Figura 6.30 – Microestructura de AA6061-F | 143 |
| Figura 6.31 – Micrografías de AA6061-F, a 100X y 500X | 143 |
| Figura 6.32 – Micrografías de material de aporte ER4043, a 100X y 500X..... | 144 |
| Figura 6.33 – Microestructura de AA6061-TT | 144 |
| Figura 6.34 – Micrografías de AA6061-TT, a 100X y 500X..... | 145 |
| Figura 6.35 – Micrografías de material de aporte ER4043, a 100X y 500X..... | 145 |

LISTA DE TABLAS

| | |
|---|----|
| Tabla 1.1 - Características de las aleaciones de aluminio forjadas sin tratamiento térmico | 11 |
| Tabla 1.2 - Características de las aleaciones de aluminio forjadas con tratamiento térmico | 12 |
| Tabla 2.1 - Porcentajes de los principales elementos en la aleación AA6061 | 15 |
| Tabla 2.2 – Composición química del AA6063 | 16 |
| Tabla 2.3 – Propiedades mecánicas de los aluminios AA6061 y AA6063 | 17 |
| Tabla 4.1 – Tipos de transferencia en base al diámetro del electrodo, amperaje y voltaje | 41 |
| Tabla 4.2 – Efecto de los cambios relativos al electrodo en el cordón de soldadura | 50 |
| Tabla 4.3 – Efecto de los cambios relativos al voltaje en el cordón de soldadura | 52 |
| Tabla 4.4 – Efecto de los cambios relativos al amperaje en el cordón de soldadura | 53 |
| Tabla 4.5 – Efecto de los cambios relativos al gas de protección en el cordón de soldadura | 55 |
| Tabla 4.6 – Efecto de los cambios relativos al ángulo de incidencia de la pistola y dirección de soldadura en el cordón | 57 |
| Tabla 5.1 - Descripción de material AA6061 | 60 |
| Tabla 5.2 - Descripción del material AA6061 en menor espesor | 61 |
| Tabla 5.3 – Descripción de material AA6063 | 63 |
| Tabla 5.4 - Fotografías de las probetas para los ensayos de tracción y resultados obtenidos | 85 |
| Tabla 5.5 – Fotografías y resultados de ensayo de tracción para probetas de aleación AA6061 de espesor 1.4mm | 88 |
| Tabla 5.6 – Resultados ensayo de tracción probeta AA6061 con precalentamiento y recocido parcial | 90 |
| Tabla 5.7 – Resultados de durezas para aleaciones AA6061 y AA6063, con y sin tratamiento térmico | 92 |
| Tabla 5.8 – Valores de dureza en función de la distancia para junta soldada de aleación AA6063 | 93 |

| | |
|---|-----|
| Tabla 5.9 – Valores de dureza en función de la distancia para junta soldada de aleación AA6061 | 93 |
| Tabla 5.10 – Valores de dureza en junta soldada de aleación AA6061 con tratamiento térmico de recocido post soldadura | 94 |
| Tabla 5.11 – Clasificación de los líquidos penetrantes y sus métodos de aplicación..... | 96 |
| Tabla 5.12 – Resultado ensayo de tintas en probetas Houldcroft..... | 100 |
| Tabla 5.13 – Resultados de ensayos de doblado guiado de cara y raíz para aleación AA6061 y AA6063..... | 103 |
| Tabla 5.14 – Resultados ensayos de doblado de cara y raíz para aleación AA6061 de menor espesor | 107 |
| Tabla 5.15 – Resultados de inspección visual para todos los tipos de juntas usadas | 115 |
| Tabla 5.16 – Calificación de los cordones de soldadura | 116 |
| Tabla 6.1 – Resultados del ensayo de tracción para AA6063-F y AA6063-TT..... | 118 |
| Tabla 6.2 – Resultados del ensayo de tracción para AA6063-F y AA6063-TT en junta soldada..... | 119 |
| Tabla 6.3 – Tamaño de las grietas encontradas en AA6063-TT | 123 |
| Tabla 6.4 – Resultados del ensayo de tracción para AA6061-F y AA6061-TT..... | 124 |
| Tabla 6.5 – Resultados del ensayo de tracción para AA6061-F y AA6061-TT..... | 125 |
| Tabla 6.6 – Resultados del ensayo de tracción pura para AA6061-F en junta soldada..... | 126 |
| Tabla 6.7 – Resultados del ensayo de tracción para AA6061-TT en junta soldada | 126 |

LISTA DE ANEXOS

| | |
|---|-----|
| ANEXO A – ESPECTROMETRÍA DE CHISPA PARA AA6061 | 160 |
| ANEXO B – ESPECTROMETRÍA DE CHISPA PARA AA6063 | 161 |
| ANEXO C – FICHA TÉCNICA DE ELECTRODO ER4043, MARCA AUFHAUSER | 162 |
| ANEXO D – FICHA TÉCNICA DE GAS DE PROTECCIÓN ARGÓN | 163 |
| ANEXO E – DETERMINACIÓN DE NÚMERO DE PROBETAS NECESARIAS PARA ENSAYOS DE TRACCIÓN Y DOBLADO, DE ACUERDO A ASME CÓDIGO IX ... | 164 |
| ANEXO F – ESCALAS DE MEDICIÓN DE DUREZA, NORMA ASTM E18 | 165 |
| ANEXO G – TIPOS, MÉTODOS DE APLICACIÓN Y TIEMPOS DE ACTUACIÓN DE LÍQUIDOS PENETRANTES, SEGÚN NORMA ASTM E-165 | 166 |
| ANEXO H – INFORME DE RESULTADOS DE ENSAYOS DE TRACCIÓN – LAEV | 167 |

RESUMEN

El presente documento se enfoca en el estudio de la soldabilidad y resistencia mecánica de los aluminios AA6063 y AA6061, bajo dos condiciones diferentes: primeramente, las dos aleaciones tratadas térmicamente por el proceso de envejecimiento y posteriormente soldadas mediante el proceso de soldadura GMAW; por otra parte, se incluye un estudio de la soldabilidad y resistencia mecánica de dichas aleaciones sin someterse a un tratamiento térmico. También dentro de este trabajo se analiza la resistencia mecánica y soldabilidad de juntas soldadas mixtas entre las dos aleaciones utilizadas para cada caso antes mencionado; es decir, con y sin tratamiento térmico. Tanto la aleación AA6063 como la AA6061 presentan buena soldabilidad y resistencia mecánica, sin embargo, en el caso de AA6061 de mayor espesor muestra mayor presencia de precipitados, lo cual provoca fragilización en el material de aporte, y por ende, una afectación en las propiedades del mismo. Finalmente, en el estudio de ambas aleaciones se aprecia buena respuesta a los ensayos realizados, con la particularidad de que la aleación AA6061 responde mejor en menores espesores.

Palabras clave: Aluminio, AA6061, AA6063, GMAW, soldabilidad, resistencia, mecánica, envejecimiento artificial.

ABSTRACT

This paper focuses on the study of weldability and mechanical strength of the AA6063 and AA6061 aluminum alloys, under two different conditions: first, the two alloys heat treated by aging process and then welded by GMAW welding process; Moreover, a study of the weldability and mechanical strength of such alloys without undergoing heat treatment is included. Also within this work will be studied weldability and the mechanical strength of welded joints between the two alloys used for each case described above, with and without heat treatment. Both the AA6063 alloy and AA6061 exhibit good weldability and mechanical strength; however, in the case of thicker AA6061 shows greater presence of precipitates, which causes embrittlement in the filler material, and thus an impairment in its properties. Finally, both alloys show a good response to the tests carried out, with the particularity that the AA6061 alloy responds better in smaller thicknesses.

Keywords: Aluminum, AA6061, AA6063, GMAW, weldability, resistance, mechanical, artificial aging.

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

1.1 RESEÑA HISTÓRICA

El uso de aluminio como elemento puro o aleado, lleva relativamente poco tiempo en la industria, ya que su descubrimiento y adición a la tabla periódica se realizó en el año de 1827 aproximadamente, aunque previamente ya se habían efectuado estudios que permitieron conocer la existencia de este metal no ferroso.

En el siglo XIX este elemento se consideraba muy valioso, tanto que llegó a comercializarse con precio similar al de la plata, e incluso se consideraba una representación de riqueza y poder dentro de las casas reales de Francia. Esto se debía principalmente al costo que implicaba su extracción, ya que en ese entonces no se contaba con la maquinaria y tecnología necesarias para facilitar este proceso.

La forma más común en la que se encuentra este elemento en la corteza terrestre es la bauxita, la cual lleva su nombre por la localidad de Les Baux, Francia, donde se encontró por primera vez. Dentro de este compuesto, el aluminio se halla en la forma de Al_2O_3 , rodeando un 30% a 54% de masa aproximadamente. A partir de este compuesto se realiza la extracción de aluminio mediante procesos que se han ido perfeccionando desde el siglo XIX en adelante.

El primer proceso que se aplica para la separación de este elemento a partir de la bauxita, es el proceso Bayer, el cual fue desarrollado por Karl Bayer, en 1889. Para comenzar, se aplica un lavado con sosa cáustica, $NaOH$, el cual permite que se reagrupen las moléculas para formar hidróxido de aluminio, $Al(OH)_3$, y se utiliza el proceso de calcinación para la obtención de alúmina, la cual es procesada mediante electrólisis para la obtención del aluminio puro.

Para la aplicación de la electrólisis, generalmente se recurre al proceso Hall-Héroult, el cual utiliza criolita para el baño electrolítico, descomponiendo la

alúmina en aluminio líquido y oxígeno molecular. Mediante variaciones de temperatura, el aluminio es aislado y se obtiene el producto final (Askeland & Phulé, 2004)

1.2 GENERALIDADES

El aluminio es el segundo elemento más abundante en el planeta, siendo el oxígeno el primero. Con un número atómico de 13, este metal se encuentra de forma abundante en la naturaleza, en forma de silicatos, y con una presencia de aproximadamente el 8% en la corteza terrestre.

Es un elemento muy utilizado en la industria, pero debido a su baja resistencia mecánica, no puede ser utilizado en aplicaciones estructurales en su estado puro, sino que debe recurrirse a aleaciones que permitan mejorar las características mecánicas del mismo.

Por ser altamente maleable, con 2, 3 o 4 en la escala de Mohs, su aplicación en usos cotidianos como embalaje de alimentos para almacenamiento se ha difundido, el mismo que se comercializa como papel aluminio.

Su densidad característica es de 2700 kg/m³, y su punto de fusión es de aproximadamente 600°C, convirtiéndolo en un metal de fácil fusión para ser transformado en otros elementos posteriormente. Este elemento es un buen conductor eléctrico y térmico, por lo que ha sustituido al cobre en diversas aplicaciones.

Por ser el segundo elemento más utilizado en aplicaciones industriales, después del acero, se ha incursionado en la investigación de nuevas tecnologías para la extracción y aislamiento de este elemento; sin embargo, el costo de recuperación del metal a partir de chatarra o reciclaje, sigue siendo relativamente más

económico que la extracción del mismo, costando apenas el 0.5% del precio de la extracción.

A nivel mundial, este elemento se ha impuesto en el sector industrial y tiene innumerables aplicaciones, dentro de las cuales se puede recalcar: elaboración de piezas industriales de distintos tipos, fabricación de calderos, utensilios de cocina y herramientas, combustible químico, debido a su alta reactividad, aplicaciones aeroespaciales y joyería. Su precio y fácil obtención en el mercado lo vuelve en un elemento indispensable en el campo industrial.

1.2.1 Resistencia mecánica y características del aluminio

Una de las principales características que le hace tan especial a este elemento es su dureza, la cual se encuentra en un rango de 15 – 120 HB (escala Brinell), valores que varían dependiendo de la aleación con la cual se esté trabajando. El aluminio y todas sus aleaciones se caracteriza por ser fácilmente deformable y poco resistente a la penetración.

Este elemento posee excelentes propiedades mecánicas dentro de los metales no ferrosos, lo que le ha permitido posicionarse como un referente infaltable en la construcción y manufactura a nivel mundial. Por ejemplo, en la industria automovilística se fabrican actualmente diversos tipos de piezas móviles y fijas para ensamblaje y se espera que en los próximos años se llegue a fabricar hasta un 25% de las carrocerías y chasis, abaratando costos de material y con ello reduciendo el precio de venta al público. (Ingemecánica, 2016)

El estudio de las propiedades del aluminio se ha llevado a cabo realizando diversos tipos de ensayos, tales como: Charpy, fatiga, tracción, dureza, metalografías, etc., de los cuales se ha obtenido valores promedio de las propiedades analizadas, permitiendo conocer de mejor forma el comportamiento del material frente a diversos tipos de esfuerzos y así determinar más

aplicaciones donde pueda ser utilizado. La resistencia a la tracción en promedio oscila entre los 160-200 MPa (23-29 ksi), dependiendo de la aleación.

Las aleaciones de aluminio presentan mejoras notables en la resistencia mecánica, incluso en altas y bajas temperaturas, llegando a reemplazar a las aleaciones de titanio en la industria aeronáutica gracias a su peso y otras propiedades.

Debido a su alta resistencia a la corrosión y durabilidad, ya que es muy estable en condiciones ambientales, es ampliamente utilizado en aplicaciones que impliquen exposición a condiciones variables. Por otro lado, también se puede recalcar que el costo del reciclaje de este elemento llega apenas al 10% de la energía utilizada en la extracción del mismo. (Wikispaces, 2016)

1.3 CLASIFICACIÓN DE LAS ALEACIONES

La aleación más utilizada en la industria es el acero, un compuesto elaborado a partir de hierro (Fe) y carbono (C), al cual se le añaden otros elementos aleantes con el fin de mejorar ciertas características mecánicas en función de la aplicación. Sin embargo, esta aleación es utilizada para aplicaciones más exigentes, ya que el acero como tal tiene un alto peso específico. Por el contrario, para otras aplicaciones menos exigentes se han empezado a utilizar aleaciones ligeras, cuya principal característica es que son hechas a partir de aluminio en combinación con otros elementos. Los principales son el cobre (Cu), magnesio (Mg), manganeso (Mn), silicio (Si) y zinc (Zn); pero también se suele añadir níquel (Ni), hierro (Fe), titanio (Ti), cromo (Cr) y cobalto (Co). Para casos especiales suelen utilizarse plomo (Pb), cadmio (Cd), antimonio (Sb) y bismuto (Bi).

Cualquiera de los elementos que se añadan, no deben superar el 15% de la masa total de la aleación, ya que en el diagrama de fases hasta ese porcentaje se puede obtener el máximo de mejora de propiedades mecánicas.

En general, estas aleaciones se consideran ligeras porque llegan a tener apenas el 1/3 del peso específico del acero.

Las aleaciones están clasificadas de acuerdo a los elementos aleantes y las características mecánicas que poseen. A continuación se enlistan las más comerciales. (Kalpakjian & Schmid, 2008)

Los números de serie utilizados para la denominación de las aleaciones de aluminio, a lo largo de todo este documento, se tomarán del sitio web de The Aluminum Association¹, ya que es el único organismo aceptado internacionalmente para asignar denominaciones de aleaciones de este metal.

- Aluminio puro, ALPUR

Se considera aluminio técnicamente puro, con una pureza de hasta el 99.5%, donde el porcentaje restante son impurezas mayormente de hierro y cobre, las cuales se adicionan con el fin de mejorar el comportamiento del material frente a deformaciones en frío. Se caracteriza por tener buena resistencia a la corrosión en condiciones ambientales y buena conductividad eléctrica y térmica, aunque no tiene muy buenas características mecánicas. Generalmente se cataloga dentro de la serie 1XXX y no se le realiza tratamiento térmico.

- Aluminio – cobre, COBRAL

Esta aleación de aluminio es de las más costosas. El cobre se caracteriza por aumentar notablemente la dureza de la aleación y mejorar por mucho las propiedades mecánicas y la maquinabilidad del material. Sin embargo, tiene una muy baja resistencia a la corrosión en condiciones ambientales y no se pueden soldar por ningún método, salvo el caso especial de soldadura por haz de electrones. Se catalogan dentro de la serie 2XXX y se les debe realizar tratamiento térmico antes de realizar cualquier mecanizado.

¹ The Aluminum Association. <http://www.aluminum.org/>

- Aluminio – manganeso

En esta aleación, el manganeso aumenta la dureza del material, la resistencia mecánica y la resistencia a la corrosión en condiciones ambientales. Se incluyen dentro de la serie 3XXX y no se les realiza tratamiento térmico.

- Aluminio – silicio

Las aleaciones de esta composición se encuentran en la serie 4XXX. Esta serie se caracteriza por contener niveles de silicio igual o superior al 12%, lo cual tiene como objetivo bajar la temperatura de fusión de la aleación. Generalmente se utiliza para crear elementos de soldadura; es decir, materiales de aporte para aleaciones con composición química similar. No tiene buenos resultados al ser tratada térmicamente, pero esto se modifica al añadir otros elementos a la aleación. La mayoría de las aleaciones pertenecientes a esta serie tienen alta resistencia al desgaste y bajo coeficiente de expansión térmica.

- Aluminio – magnesio – silicio, SIMAGAL

El silicio mejora la dureza y fluidez de la aleación, mientras que el magnesio mejora su comportamiento en condiciones ambientales y la soldabilidad. Esta aleación se caracteriza por tener gran resistencia al impacto y alta conductividad térmica y eléctrica. La serie 6XXX no lleva tratamiento térmico y son de los más aptos para deformación en frío después de recocido y se utilizan ampliamente en perfilería por tener excelente resistencia a la corrosión y facilidad de mecanizado, todo esto se debe a la estructura cristalina modificada de grano fino; además, es de amplia utilización en la industria marítima por su alta resistencia a la corrosión, aunque no es muy útil en aplicaciones ornamentales ya que se ennegrece con el tiempo. La serie 5XXX tiene similares características, pero se diferencia en la dificultad de mecanizado. Las aleaciones de aluminio que se analizarán a lo largo de este trabajo pertenecen a la serie 6XXX.

- Aluminio – zinc, ZINCAL

Son relativamente más económicos que las aleaciones Al-Cu, con propiedades mecánicas similares. Se diferencian en su baja resistencia a la corrosión. Pertenecen a la serie 7XXX y se les aplica tratamiento térmico.

1.4 NOMENCLATURA Y SIMBOLOGÍA DE LAS ALEACIONES

Desde que se empezó a utilizar aleaciones de aluminio hace un par de décadas atrás, se decidió asignar nomenclaturas que se puedan utilizar a nivel internacional, en un sistema unificado tal como sucede en los aceros, que a pesar de tener distintas nomenclaturas, todas se manejan bajo parámetros similares.

En el caso de las aleaciones de aluminio, *The Aluminum Organization* se ha convertido en el principal referente a nivel internacional desde la década de 1970 en adelante, ya que presenta las aleaciones por series, las mismas que se designan de acuerdo a los elementos aleantes que contienen. En el apartado anterior se utilizó la nomenclatura generada por esta organización, ya que en el país se utiliza ésta para designar las aleaciones de aluminio que se fabrican y comercializan.

Cabe añadir que existen otros sistemas de designación de aleaciones de aluminio, como lo es ALCAN (Canadá), que es la segunda organización aceptada internacionalmente para designación de aleaciones de aluminio por ser Canadá uno de los principales productores de este metal a nivel mundial.

1.5 SISTEMA DE DESIGNACIÓN DE LA ALEACIÓN

De acuerdo al libro *Introducción a la metalurgia física*, de Sydney Avner (Avner, 1995), el sistema de designación de la aleación se puede resumir de la siguiente forma:

La designación del aluminio forjado y de las aleaciones forjadas al aluminio [...] consta de un sistema de numeración de cuatro dígitos. El primero indica el grupo de aleación, el segundo señala el cambio de la aleación

original o límites de impureza; el cero se utiliza para la aleación original, y los enteros del 1 al 9 indican las modificaciones de la aleación. En el grupo 1XXX para aluminio con un mínimo de purzas del 99% y mayores, los dos últimos dígitos son los mismos que los dos a la derecha del punto decimal en el porcentaje de mínimo de aluminio cuando se expresa a casi el 0.01% [...]. En los grupos de aleación del 2XXX al 8XXX, los dos últimos dígitos sirven sólo para identificar las diferentes aleaciones de aluminio en el grupo. (p. 477)

1.5.1 Designación para aleaciones de aluminio en bruto

Dentro de este tipo de aluminios se tienen varias aleaciones que pueden entrar en esta clasificación tal como lo establece la Aluminium Association. En las que dichas aleaciones se identifican por una combinación de cuatro dígitos de la forma 1xxx, 2xxx, etc. De acuerdo a la serie de la aleación. También se puede añadir una designación considerando si este ha recibido algún proceso de temple o recocido.

Para la designación de estas aleaciones, el primer dígito usado se refiere al elemento aleante principal, el cual es el encargado de definir la serie, como se describe en el literal 1.3 de este mismo escrito.

Un ejemplo de este serie sería el aluminio 1060 el cual posee como mínimo una presencia de aluminio en un 99.60%. (Kalpakjian & Schmid, 2008) (The Aluminium Association, 2016)

1.5.2 Designación para aleaciones de aluminio fundidas

En la designación de estas aleaciones según la Aluminium Association, también se la realiza mediante la combinación de cuatro dígitos con el formato 1XX.X, 2XX.X y así sucesivamente dependiendo de la serie a la cual pertenezca la aleación, partiendo del principal elemento aleante que contiene. La única

diferencia en el formato para la designación de este tipo de aleaciones es que el dígito a la derecha del punto decimal designa la forma o presentación de la aleación.

Para aleaciones fundidas y en bruto que posean una designación de temple esta será definida agregando una letra y un número al final del tipo de aleación de la siguiente forma:

- F, para aleaciones sin tratamiento térmico posterior.
- O, con tratamiento térmico de recocido.
- H, aleación endurecida por deformación en frío.
- T, para designar aleaciones sometidas a tratamiento térmico principalmente de temple.
- W, para aleaciones tratadas únicamente por solución.

(Kalpakjian & Schmid, 2008)

En la figura 1.1, se observan los distintos grupos que conforman las aleaciones de aluminio, en base a sus principales elementos aleantes.

| Nomenclatura de aleaciones de aluminio forjado y fundido. | | |
|---|---------------------|---------------------|
| Grupo de aleación | Código para forjado | Código para fundido |
| Aluminio, pureza de 99.0% o mayor | 1XXX | 1XX.X |
| Aleaciones de aluminio, por elemento(s) principal(es) | | |
| Cobre | 2XXX | 2XX.X |
| Manganeso | 3XXX | |
| Silicio + cobre o magnesio | | 3XX.X |
| Silicio | 4XXX | 4XX.X |
| Magnesio | 5XXX | 5XX.X |
| Magnesio y silicio | 6XXX | |
| Zinc | 7XXX | 7XX.X |
| Estaño | | 8XX.X |
| Otros | 8XXX | 9XX.X |

Figura 1.1 - Nomenclatura y grupos de las aleaciones de aluminio²

² Groover, M. (2007). *Fundamentos de manufactura moderna* (Tercera edición ed.). Mexico: McGraw-Hill Interamericana. Pág. 113

1.6 ALUMINIOS ESTRUCTURALES

Existen varias series de aluminios usados en aplicaciones estructurales ya sean éstas en perfiles, ángulos o cualquier tipo de elemento estructural normalizado. Estos elementos estructurales son usados en una amplia gama de industrias como por ejemplo la aeronáutica, civil o naval, en donde las propiedades anticorrosivas o de baja densidad constituyen un aspecto muy importante en este tipo de industrias. Cabe señalar que este tipo de aluminios han sido aleados con otros elementos con la finalidad de potenciar las propiedades mecánicas del material y así mejorar significativamente la resistencia mecánica de la aleación.

De acuerdo al PennState College of Engineering, las aleaciones más usadas en aplicaciones estructurales son detalladas a continuación.

Dentro de la serie 2XXX se tiene a los tipos 2014-O, 2014-T4, 2014-T6, como las principales aleaciones usadas en elementos estructurales. Estas aleaciones son muy usadas en chasis de vehículos, la estructura de aviones, en la fabricación de partes de automóviles tales como pistones y cilindros, además de otras piezas mecánicas.

En la serie 6xxx se encuentran a los tipos 6061-O, 6061-T4, 6061-T6, T651, que son los más usados en aplicaciones estructurales por ejemplo en tuberías, en aplicaciones marítimas como cascos de botes, muebles, aplicaciones agrícolas, aeronaves, en aplicaciones en el área de la construcción y muchas otras más. En donde estas aleaciones poseen buena resistencia y maquinabilidad así como una buena soldabilidad, lo cual facilita en ensamblaje de estructuras.

Finalmente, en la serie 7XXX se tienen a las aleaciones 7050-T7651, como las más usadas en el ámbito estructural, en donde su mayor aplicación se da en estructuras de aviones y equipos de competencia como lanchas rápidas, alas delta y demás equipos utilizados para la recreación de alta competitividad.

Cabe señalar que las demás series pueden también tener aplicaciones estructurales enfocadas a aplicaciones específicas; sin embargo, las principales series de aluminio asociadas a aplicaciones estructurales son las señaladas anteriormente. (PennState College of Engineering, 2016)

1.7 CARACTERÍSTICAS DE LAS ALEACIONES DE ALUMINIO FORJADAS

Las aleaciones de aluminio forjadas se subdividen en dos grupos dependiendo de si éstas pueden ser sometidas a un tratamiento térmico, o no.

En cuanto a las aleaciones que no reciben un tratamiento térmico, para mejorar su resistencia mecánica únicamente pueden sufrir deformaciones en frío para así modificar esta propiedad. En este subgrupo existen tres series, las cuales son: la 1XXX, 3XXX y 5XXX; es decir, principalmente aquellas aleaciones consideradas de aluminio puro, aluminio-manganeso y aluminio-magnesio, cuyas características se detallan en la siguiente tabla.

Tabla 1.1 - Características de las aleaciones de aluminio forjadas sin tratamiento térmico

| Serie | Resistencia [MPa] | Resistencia [ksi] | Características |
|-------|-------------------|-------------------|--|
| 1XXX | 90 | 13 | Aleación de aluminio puro con impurezas de Fe y Si, usadas para conducción eléctrica y láminas delgadas de aluminio |
| 3XXX | 110 | 16 | Aleación que presente muy buena maquinabilidad en comparación a otras aleaciones. |
| 5XXX | 193 | 28 | Aleación de alta resistencia usada principalmente para fabricación de chapa metálica en la industria automotriz y naval. |

Modificado de (Universidad Politécnica de Valencia, 2016)

En cuanto al segundo subgrupo de aleaciones, las mismas que sí son tratables térmicamente con la finalidad de aumentar su resistencia y que pueden ser

usadas en más aplicaciones se tiene las de la series 2xxx, 6xxx y finalmente 7xxx. Estas aleaciones contienen primordialmente elementos como cobre, silicio y magnesio. Las características de estas series se pueden observar en la siguiente tabla.

Tabla 1.2 - Características de las aleaciones de aluminio forjadas con tratamiento térmico

| Serie | Resistencia [MPa] | Resistencia [ksi] | Características |
|--------------|--------------------------|--------------------------|--|
| 2xxx | 442 | 64 | Endurecida por precipitación, usada en fuselaje de aviones, la aleación posee gran resistencia a la fractura y a la tracción. |
| 6xxx | 290 | 42 | Aleación de buena resistencia mecánica usada en estructuras a nivel general. |
| 7xxx | 504 | 73 | Aleación sometida a envejecimiento natural, posee elevada resistencia mecánica. Serie muy usada en el ámbito aeronáutico y en la industria automovilística debido a sus buenas prestaciones. |

Modificado de (Universidad Politécnica de Valencia, 2016)

En cuanto a las aleaciones tratadas térmicamente, las características descritas en la tabla anterior son alcanzadas mediante el tratamiento térmico de las mismas por diferentes procesos.

1.8 APLICACIONES Y USOS DEL ALUMINIO EN EL PAÍS

En el país, así como a nivel mundial, se ha evidenciado un aumento del uso del aluminio en los últimos años y ha sido incluido en la fabricación de muchos productos, tales como elementos de mobiliario y sobretodo en el ámbito de la construcción, como es el caso de paneles de aluminio compuesto para el revestimiento de edificaciones, uso de aluminio en pasamanos, marcos de ventanas, etc.

El crecimiento del uso de aluminio en el país también se ha visto influenciado por el desarrollo de procesos para la obtención del material a costos más competitivos con respecto a otros productos similares, además de la ventaja de su alta resistencia a la corrosión y baja densidad lo que lo convierten en un elemento muy versátil para un sinnúmero de aplicaciones.

Los principales sectores en los que se evidencia la utilización del aluminio en sus productos son el de la construcción, transporte, envases, industria eléctrica, industria en general, artículos domésticos, entre otros.

En el país, si bien no ha habido un desarrollo considerable de la minería para el procesamiento de aluminio, existen varias empresas dedicadas al reciclaje de este metal, con la finalidad de aprovechar dicho material y producir perfiles, varillas u otros elementos estructurales en base a aluminio a un bajo costo de fabricación. Por otro lado, gran parte de la demanda de aluminio en el país es resuelta mediante la importación de tochos de aluminio como materia prima para posteriormente elaborar paneles compuestos, partes mecánicas, mobiliarios, perfiles y chapas metálicas usadas en la industria automotriz del país.

Aunque en el país el desarrollo de industrias que utilizan el aluminio no se ha desarrollado completamente, la demanda de productos en base de este metal promoverá el crecimiento de dicha industria, por lo cual se pronostica un incremento sustancial de este sector industrial en el país.

CAPÍTULO 2

ALUMINIOS ESTRUCTURALES AA6061 Y AA6063

2.1 PROPIEDADES DE LOS ALUMINIOS AA6061 Y AA6063

Por estar dentro del mismo grupo de aleaciones, los aluminios AA6061 y AA6063 tienen características similares en lo que respecta a la resistencia al impacto y la conductividad térmica y eléctrica, tal como se desarrolló en el capítulo 1.

ALUMINIO 6061

El aluminio 6061 es una aleación de aluminio con otros elementos químicos con la finalidad de mejorar la estética del material, pero principalmente con el propósito de incrementar las propiedades mecánicas del mismo, logrando así que la nueva aleación del material tenga mayores aplicaciones en la industria.

El aluminio 6061 es una aleación a base de aluminio (Al), magnesio (Mg) y silicio (Si), principalmente. En ella también se encuentran otros elementos que influyen en la mezcla; sin embargo, los mencionados son los principales, además de encontrarse en mayor proporción.

Según la Aluminum Association, describe a la serie 6XXX como: “La serie 6XXX son aleaciones versátiles, tratables térmicamente, altamente conformable, soldable y tienen moderadamente alta resistencia junto con una excelente resistencia a la corrosión. Las aleaciones de esta serie contienen silicio y magnesio con el fin de formar siliciuro de magnesio dentro de la aleación. Productos de extrusión de la serie 6XXX son la primera elección para aplicaciones arquitectónicas y estructurales. La aleación 6061 es la aleación más usada en esta serie y se utiliza a menudo en los bastidores de camiones y botes. Además, el marco del iPhone 6 fue hecha de aleación de la serie 6XXX”. (The Aluminium Association, 2016)

Las principales características de este tipo de aleación son su buena resistencia a la corrosión, alta resistencia mecánica y buena soldabilidad, lo que contribuye a

que se convierta en un material muy versátil usado ampliamente en todo tipo de industrias desde aplicaciones aeroespaciales hasta materia prima para la elaboración de cuadros de bicicletas de alta competencia.

De acuerdo al fabricante los porcentajes de los componentes de la aleación de aluminio 6061 pueden variar; sin embargo, se observa una clara tendencia al predominio de las concentraciones de Magnesio y Silicio. Un ejemplo de los elementos que intervienen en la aleación y su porcentaje es el siguiente, de acuerdo a la norma NTE INEN 2 250:2000.

Tabla 2.1 - Porcentajes de los principales elementos en la aleación AA6061

| Elemento | Porcentaje (%) |
|-----------------|-----------------------|
| Silicio | 0.40 / 0.80% |
| Hierro | 0.7% máximo |
| Cobre | 0.15 / 0.40% |
| Magnesio | 0.8 / 1.2% |
| Cromo | 0.04 / 0.35% |
| Zinc | 0.25% máximo |
| Titanio | 0.15% máximo |

Modificado de Instituto Ecuatoriano de Normalización (2016)

ALUMINIO 6063

La serie 6XXX, denominada así por The Aluminum Association, se caracteriza por contener mayoritariamente magnesio (Mg) y silicio (Si) como elementos aleantes, además de otros en menor porcentaje, los cuales modifican la resistencia mecánica, resistencia a la corrosión y mejoras en la soldabilidad. Por otro lado, al añadir un tratamiento térmico al material, se puede obtener mucho mejores resultados en lo que respecta a propiedades; sin embargo, se debe elegir el tratamiento térmico de acuerdo a la aplicación en la cual será utilizado el material. Esta serie se ha implantado en el mercado mundial para su aplicación en la construcción, ya que esta aleación en particular se utiliza en perfilería y mobiliario, por su facilidad de extrusión y mecanizado, además de ser relativamente económico.

A nivel mundial, cada empresa puede fabricar su propia aleación AA6063, siempre y cuando se mantenga dentro de los límites establecidos por The Aluminum Association. En el país, el Instituto Ecuatoriano de Normalización, INEN, ha establecido los límites dentro de los cuales se puede trabajar para la obtención de la aleación en la norma NTE INEN 2 250:2000, donde la composición química se define de acuerdo a la siguiente tabla.

Tabla 2.2 – Composición química del AA6063

| Aleación ISO/ANSI/ASTM | Límites | Si (%) | Fe (%) | Cu (%) | Mn (%) | Mg (%) | Cr (%) | Zn (%) | Ti (%) | Otros (%) | Al (%) |
|---------------------------|---------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|--------------|-----------|
| 6063 | mín. | 0,6 | 0,35 | 0,1 | 0,1 | 0,9 | 0,1 | 0,1 | 0,,1 | 0,05/0,15 | Resto |
| | máx. | 0,2 | ... | ... | ... | 0,45 | ... | ... | ... | ... | |
| 6063A | mín. | 0,6 | 0,35 | 0,1 | 0,15 | 0,9 | 0,05 | 0,15 | 0,1 | 0,05/0,15 | Resto |
| | máx. | 0,3 | 0,15 | ... | ... | 0,6 | ... | ... | ... | ... | |

Modificado de Instituto Ecuatoriano de Normalización (2016)

2.1.1 Resistencia mecánica

La resistencia mecánica de un material se define como la capacidad del mismo para resistir un esfuerzo o un conjunto de fuerzas aplicado sobre él, sin adquirir deformaciones o cambios permanentes.

Como todos los elementos que se utilizan en el campo de la construcción, el aluminio tiene una resistencia mecánica de entre 160 a 200 MPa (23-29 ksi) en su estado puro. Sin embargo, al cambiar la composición química para convertirlo en una aleación del tipo AA6063 puede llegar a los 190 MPa (28 ksi) aproximadamente. Esto se debe a la acción de los elementos aleantes sobre el metal puro.

Dentro de las propiedades que se modifican, de acuerdo al elemento añadido, se puede resaltar:

- *Cromo*: Aumenta la capa reforzada por el endurecimiento y mejora la resistencia al desgaste y corrosión.

- *Cobre*: Mejora significativamente la resistencia a la corrosión en condiciones ambientales y de alta exposición.
- *Manganeso*: Desoxidante. Facilita el mecanizado y el trabajo en caliente. Contribuye a mejorar la resistencia y dureza.
- *Silicio*: Desoxidante y endurecedor.
- *Titanio*: Desoxidante. Aumenta la resistencia a altas temperaturas.

Además, los otros elementos que se añaden contribuyen a reforzar las características mejoradas en la aleación, permitiendo que el resultado final tenga mejores propiedades mecánicas y ampliando el campo de aplicación de la misma. (Infoacero, 2016)

En cuanto a la resistencia mecánica de la aleación 6061 esta varía a menudo dependiendo del tratamiento térmico que puede haber sufrido la aleación, donde la resistencia a la tracción del material varía significativamente; sin embargo, otras propiedades como el módulo de Young se mantiene constante en el material indistintamente del tratamiento térmico.

En general la aleación 6061 tiene una buena resistencia mecánica en comparación con otras aleaciones de aluminio como por ejemplo respecto al 6063.

Tabla 2.3 – Propiedades mecánicas de los aluminios AA6061 y AA6063

| | Resistencia a la tracción (ksi) | Límite elástico (ksi) | Resistencia al cizallamiento (ksi) | Elongación en 2" | Dureza Brinell |
|-------------------------|--|------------------------------|---|-------------------------|-----------------------|
| 6061 Estructural | 45 | 40 | 30 | 17 | 95 |
| 6063 Estructural | 27 | 21 | 17 | 12 | 60 |

Según el portal Speedy Metals, se puede observar en la tabla 2.3 una comparación de propiedades para ambas aleaciones, en donde queda evidente el

mejor comportamiento del aluminio AA6061 en los diferentes ensayos. (Speedy Metals, 2016)

2.1.2 Soldabilidad

Como se expuso anteriormente, las aleaciones AA6061 y AA6063 pertenecen a la serie 6XXX, la cual se caracteriza por sus buenas propiedades mecánicas en lo que respecta a soldabilidad y resistencia al impacto.

Sin embargo, varios estudios realizados alrededor de las series de aleaciones 6XXX y 7XXX han permitido concluir que las dos series tienen buena soldabilidad, antes y después de la aplicación de un tratamiento térmico, con algunas excepciones pertenecientes a la serie 7XXX, las cuales tienen problemas de soldadura debido al crecimiento granular acelerado en la zona afectada por el calor después de la soldadura. (Gómez de Salazar, Ureña, Villauriz, Manzanedo, & Barrena, 1998)

Cabe destacar que la soldabilidad de un material no puede definirse específicamente, ya que siempre dependerá de muchas variables, tales como el proceso de soldadura seleccionado, tipo de aleación, material de aporte utilizado, tratamiento térmico pre y post soldadura, entre otras prestaciones requeridas. (Lean Sifuentes, 2016)

A su vez, la serie 6XXX presenta buena soldabilidad cuando se trabaja con proceso MIG, variante del GMAW, con lo cual se orientará el análisis de la variación de las propiedades mecánicas del material para verificar los cambios en la soldabilidad antes y después del tratamiento térmico.

2.1.2.1 Normas para soldadura de las aleaciones de aluminio AA6061 y AA6063

El aluminio, tanto en su estado puro como en aleación, se caracteriza por ser un metal con alta soldabilidad y de fácil mecanizado, por lo cual se han diseñado

normas que permitan el manejo del mismo de acuerdo a estándares de trabajo que permitan obtener el mejor desempeño del material.

A continuación se detallan algunas normas especificadas por la American Welding Society³ y The Aluminum Association, las mismas que están enfocadas a la obtención de buenos cordones de soldadura en aluminios y sus aleaciones.

- ALUMINUM DESIGN MANUAL >> The Aluminum Association

Este manual ha sido creado con el fin de ofrecer especificaciones que permitan trabajar de forma unificada a nivel internacional en lo que respecta al diseño de estructuras de aluminio y sus aleaciones, por ende presenta valores de cargas dentro de los cuales es posible trabajar, incluyendo las variaciones de las mismas para uniones soldadas. (The Aluminum Association, 2005)

- SPECIFICATIONS FOR ALUMINUM STRUCTURES >> The Aluminum Association

Las especificaciones de este manual están enfocadas a las cargas que las estructuras de aluminio y sus aleaciones pueden soportar, analizando todo tipo de esfuerzos a los que puede estar sometido el elemento en cuestión. (The Aluminum Association, 1968)

- AWS D1.2 >> STRUCTURAL WELDING CODE FOR ALUMINUM

Este código presenta los requerimientos mínimos para realizar cualquier tipo de unión soldada en elementos estructurales fabricados de aluminio y sus aleaciones, exceptuando cilindros de presión y tuberías de transporte de líquidos. (American Welding Society, 2003)

- AWS A5.10 >> SPECIFICATION FOR BARE ALUMINUM AND ALUMINUM ALLOY WELDING ELECTRODES AND RODS

³ American Welding Society. <http://www.aws.org/>

Mediante esta norma se puede realizar la selección del material de aporte para la soldadura por proceso GMAW, ya que presenta especificaciones para electrodos continuos utilizados en diferentes procesos, incluyendo GMAW, GTAW y soldadura oxiacetilénica. (American Welding Society, 2002)

2.1.2.2 Ensayos de soldabilidad

Los ensayos de soldabilidad que se realizan en probetas estandarizadas, previamente sometidas a un proceso de soldadura, están enfocados a obtener resultados en lo que concierne a resistencia mecánica y calidad del cordón de soldadura.

Aunque existen muchos tipos de ensayos de soldabilidad, siempre deben ser seleccionados de acuerdo al material base, material de aporte, tipo de proceso de soldadura con el que se está trabajando, tipo de probeta utilizada y los resultados que se desea obtener.

A continuación se encuentra una breve descripción de algunos ensayos de soldabilidad, los mismos que son ampliamente utilizados en la industria de los aluminios, bajo las condiciones necesarias para el desarrollo del presente trabajo.

2.1.2.2.1 Ensayo de parche circular

Este ensayo tiene como objetivo el determinar la susceptibilidad del material a la formación de grietas en el metal de aporte del cordón de soldadura, además de analizar el agrietamiento en caliente y frío en la zona afectada por el calor, ZAC. (Messler, Jr., 2004)

Para este ensayo se utiliza una placa base en la cual se ha realizado un orificio circular y además un parche de la misma geometría. Los dos elementos deben someterse a un proceso de maquinado para evitar la presencia de aristas vivas. Se pueden realizar una o varias pasadas de soldadura y la presencia de fisuras

puede ser detectada mediante ensayos no destructivos de radiografía industrial o tintas penetrantes. Cabe recalcar que este ensayo puede ser aplicado a cualquier material; sin embargo, es más recomendable para aceros. (David & Woodhouse, 1987)

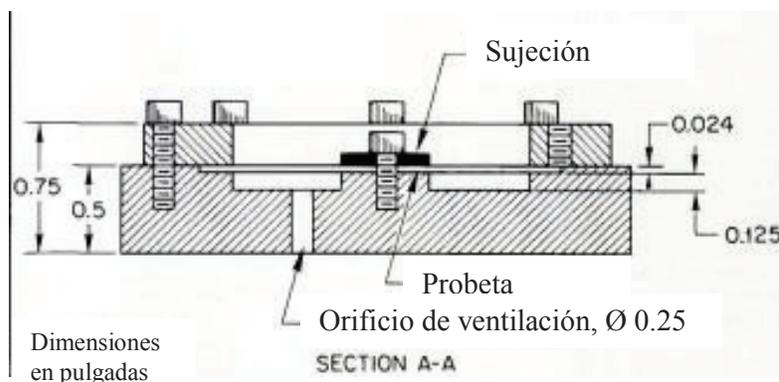


Figura 2.1- Esquema del ensayo de parche circular⁴

2.1.2.2.2 Ensayo Batelle

Para este ensayo se debe realizar una soldadura de ranura, siguiendo los procedimientos especificados en la norma respectiva. Mediante este ensayo se puede estudiar la predisposición del material de aporte a la formación de grietas o fisuras, analizando las mismas desde su punto inicial en la probeta analizada.

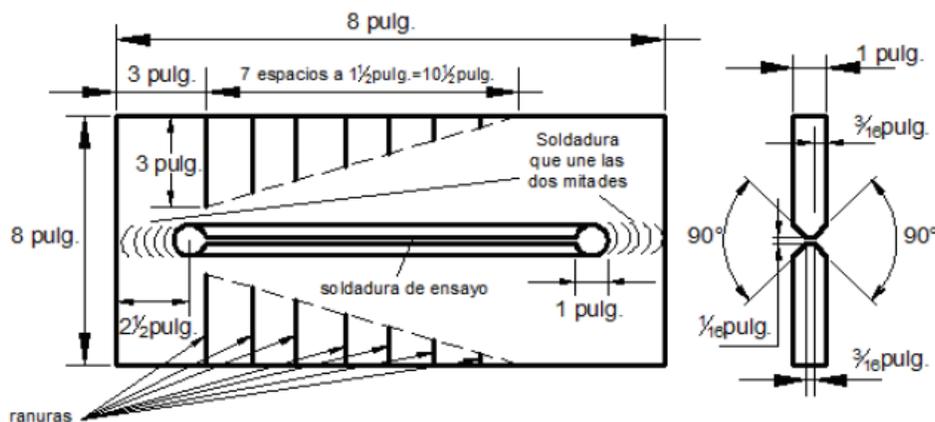


Figura 2.2 – Esquema del ensayo Battelle⁵

⁴ David, S., & Woodhouse, J. (1987). Weldability tests for thin sheet materials. *Welding Journal*, 130-134.

⁵ Messler, Jr., R. (2004). *Principles of welding: Processes, Physics, Chemistry and Metallurgy*. Weinheim: Wiley-VCH. Pág 583

2.1.2.2.3 Ensayo Varestraint

El ensayo Varestraint, abreviatura de *variable restraint* por su definición en inglés para restricción variable, es un procedimiento que se realiza para evaluar el fisuramiento en la zona afectada por el calor durante la solidificación.

Para este ensayo se realiza una pasada de soldadura con penetración incompleta para caracterizar la distribución de temperatura y microestructura en el material analizado, además de simular los requerimientos mecánicos del cordón de soldadura y el material base mediante un aumento de la deformación con cargas variables preestablecidas en normas.

Se realiza colocando la probeta en voladizo en un mandril y se procede a aplicar el cordón de soldadura en la ranura mecanizada para dicho fin.

A medida que se avanza en la soldadura, la probeta soldada recibe diferentes cargas con respecto a un dado curvado, para adoptar la forma del mismo en función de los esfuerzos aplicados.

La tensión resultante para las fisuras de solidificación en la zona afectada por el calor del material base, se analiza estadísticamente para determinar la susceptibilidad del material base a formar fisuras o grietas. (Osorio, 1987)

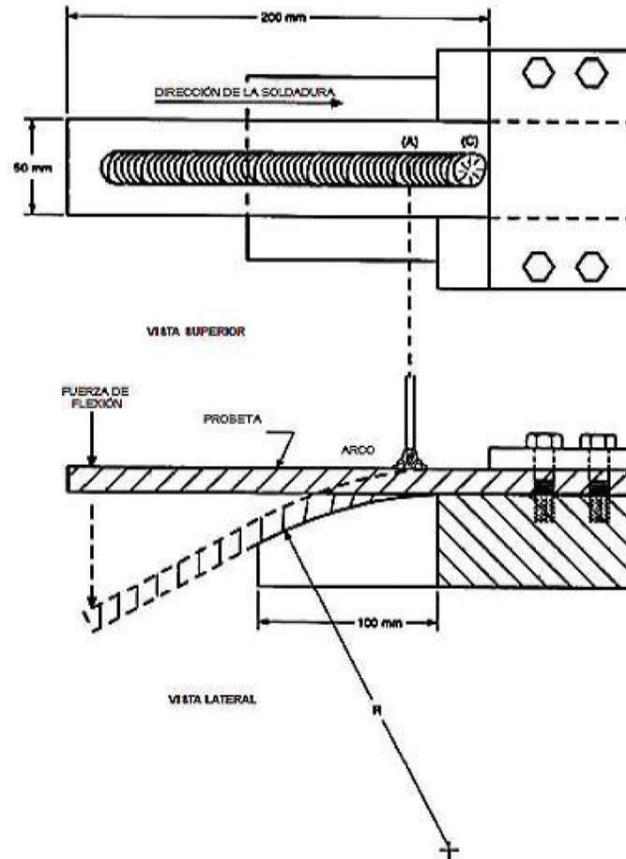


Figura 2.3 – Esquema del ensayo Varestraint⁶

2.1.2.2.4 Ensayo Trans-Varestraint

Esta es una variante del ensayo anterior en donde la muestra es doblada de forma transversal a la dirección de la soldadura. En donde de la misma forma se aplica un esfuerzo gradual a la probeta con la finalidad de doblar la muestra hasta una curvatura predefinida.

En esta variante de ensayo se tiene como característica que la mayoría de las grietas o fisuras que se originen aparecerán al interior del cordón de soldadura (metal de aporte).

⁶ Osorio, V. (1987). Evolución del ensayo Varestraint. Remetallica, Pág 50-54.

En la figura 2.4 se observa este tipo de ensayo en donde se evidencia la diferente orientación del cordón de soldadura con respecto al ensayo anterior. (Kou, 2003)

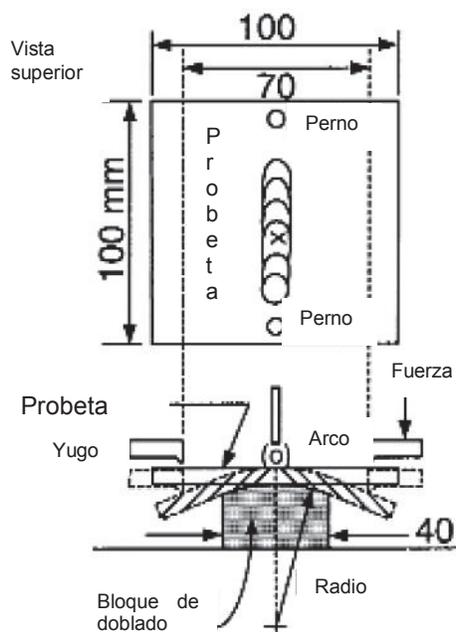


Figura 2.4 – Esquema del ensayo Trans-Varestraint⁷

2.1.2.2.5 Ensayo Houldcroft

Este ensayo busca analizar la susceptibilidad que posee un espécimen al agrietamiento en la solidificación que aparece en juntas soldadas. En donde la longitud de la grieta, que se origina desde el borde de la muestra, es el factor que indica que tan susceptible es una junta al agrietamiento. En algunos casos se elaboran ranuras en la probeta con la finalidad de disipar los esfuerzos, como se detalla en la figura 2.5, en donde se observa un ejemplo de diseño probeta para este ensayo, también denominado “espina de pescado”.

⁷ Kou, S. (2003). Welding Metallurgy. New Jersey: Wiley-Interscience, Pág 267

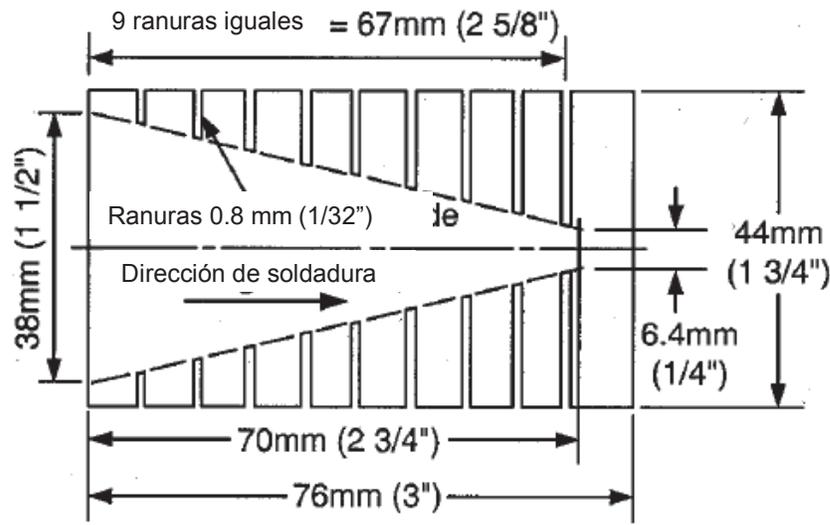


Figura 2.5 – Esquema del ensayo Houldcroft⁸

El agrietamiento en la probeta se origina al borde de la misma y esta se propaga por toda la línea central siguiendo el cordón de soldadura. Se usa una fuente calor la cual se apunta primeramente hacia el borde donde empieza el agrietamiento y se sigue la línea central, esto provoca que la solidificación comience, pero debido a que el borde inicial de la grieta continua expandiéndose, esto origina que exista una separación del material en la probeta originando así la grieta en el mismo.

Para este tipo de ensayo existen tres tipos de probeta principalmente.

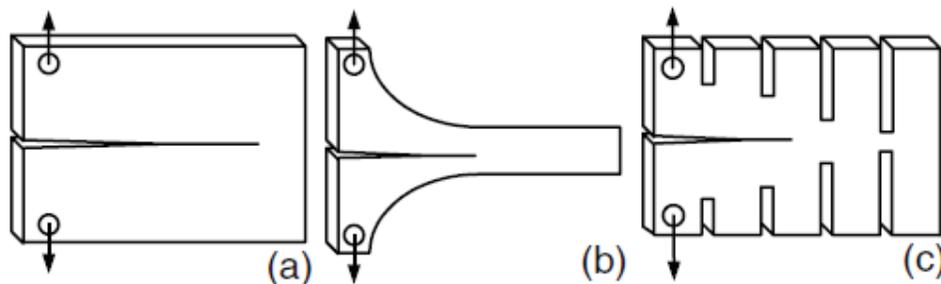


Figura 2.6 – Tipos de probetas para el ensayo Houldcroft⁷

En estas tres diferentes configuraciones de probetas lo que se busca es reducir el esfuerzo que se origina dentro del material mediante el cambio de sección en la misma o el uso de ranuras para así disipar esfuerzos y lograr que el agrietamiento

⁸ Kou, S. (2003). Welding Metallurgy. New Jersey: Wiley-Interscience. Pág. 265, 266

no atraviese todo el material, sino que este se detenga y gracias a ello tener una medida de la susceptibilidad del material al agrietamiento. (Kou, 2003)

2.1.2.2.6 Ensayo Finger test

Este ensayo también sirve para determinar la susceptibilidad al agrietamiento, en donde se evalúa el porcentaje de ancho del cordón de soldadura que contenga grietas.

Para este proceso como se observa en la figura 2.7 se apilan barras a las cuales se las comprime usando una determinada fuerza en base al ancho de cada barra (mayor fuerza para barras más delgadas). En este ensayo la interfaz entre cada barra actúan como grietas en el material de aporte. Al final del ensayo se retira la fuerza aplicada y se observa el porcentaje de agrietamiento que queda en el cordón para así evaluar la susceptibilidad del material a agrietarse. (Messler, 2004)

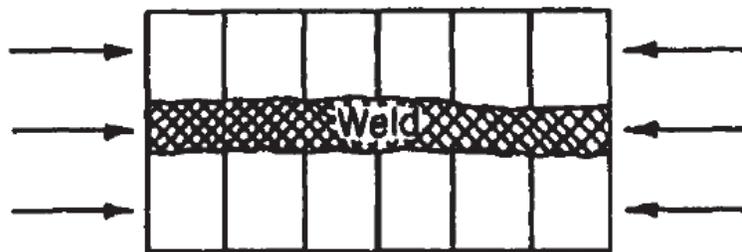


Figura 2.7 – Esquema del ensayo Finger Test⁹

2.1.2.2.7 Ensayo de pelado y desgarre

En este ensayo destructivo se busca analizar la soldabilidad de dos juntas a traslape mediante la aplicación de fuerzas a tracción en direcciones contrarias con la finalidad de separar ambas juntas.

⁹ Messler, Jr., R. (2004). Principles of welding: Processes, Physics, Chemistry and Metallurgy. Weinheim: Wiley-VCH. Pág. 582.

Mediante esto, se logra evidenciar si existe una buena unión o interfaz entre el material de aporte y el metal base así como la capilaridad del material de aporte, esto se observa una vez que se separan ambas placas y quedan expuestas las zonas en donde hubo buena o mala unión de los metales. En la figura 2.8 se observa cómo se colocan las juntas para este tipo de ensayo. (Messler, 2004)

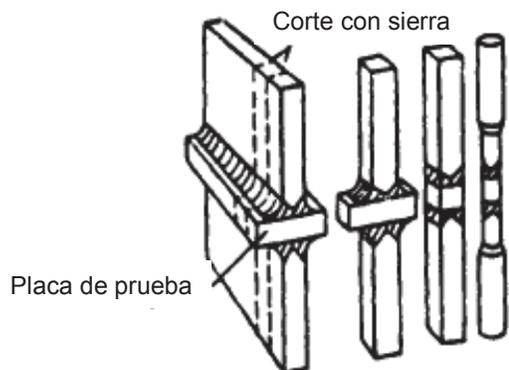


Figura 2.8 – Esquema del ensayo de pelado y desgarre¹⁰

2.2 EMPRESAS DE PRODUCCIÓN NACIONAL DE ALUMINIO ESTRUCTURAL AA6061 Y AA6063

En el Ecuador existen varias empresas dedicadas a la comercialización de estructuras de aluminio ya sean estas para ventanas, puertas, recipientes, etc. Algunos estos productos son elaborados mediante la importación de materia prima puesto a que en el país no se cuenta con una industria que procese en mineral alúmina con la finalidad de obtener las distintas aleaciones comerciales que existen en el mercado.

Por otra parte también existen varias empresas tales como Cedal, las cuales aprovechan el reciclaje para la obtención de algunas aleaciones de aluminio

¹⁰ Messler, Jr., R. (2004). Principles of welding: Processes, Physics, Chemistry and Metallurgy. Weinheim: Wiley-VCH. Pág. 605

mediante el uso de hornos donde nuevamente se funde el aluminio y se obtiene así materia prima para la elaboración de sus productos estructurales.

En cuanto a las aleaciones AA6061 y AA6063, estas son las más usadas en este tipo de industria debido a sus buenas propiedades tanto mecánicas como de soldabilidad, siendo de esta manera las aleaciones que se encuentran comúnmente en el mercado nacional.

CAPÍTULO 3

TRATAMIENTO TÉRMICO POR ENVEJECIMIENTO

El aluminio y sus aleaciones, así como otros materiales utilizados en la industria, pueden ser sometidos a tratamientos térmicos con el objetivo de mejorar sus propiedades, en especial la resistencia mecánica.

Existen varios tipos de tratamientos térmicos, los cuales deben ser seleccionados de acuerdo al objetivo que se desee lograr y los cambios finales que se espera obtener en el material con el que se está trabajando.

3.1 TRATAMIENTOS TÉRMICOS PARA EL ALUMINIO

3.1.1 Recocido

El recocido es un tratamiento térmico que se aplica al material después de la deformación en frío. Se utiliza para aliviar tensiones en el material, las mismas que pueden aparecer debido a la acumulación de granos de diferentes tamaños de los materiales aleantes utilizados en el mismo. Este proceso se realiza en estado sólido y se requiere enfriamiento lento y controlado dentro del horno. Se divide en tres partes: recuperación, recristalización y crecimiento de grano. (Avner, 1995)

La primera fase, el recocido de recuperación, es un proceso que se realiza a baja temperatura, donde no se obtiene mayores variaciones microestructurales en el material. En esta etapa del proceso se obtiene mayormente alivio de esfuerzos internos, además de producirse un pequeño incremento en la dureza, resistencia mecánica y conductividad eléctrica.

La segunda fase, conocida como recristalización, permite una modificación de la estructura interna del material. Durante el proceso de deformación en frío, los granos que componen la microestructura tienden a alargarse y se producen esfuerzos internos en los puntos donde no se produce esta formación. Sin

embargo, durante la recristalización los granos no deformados se agrupan y empieza un nuevo proceso de nucleación, el cual avanza a medida que los átomos ganan energía de la temperatura que afecta al material, aumentando la resistencia mecánica del mismo.

Por último, a raíz de la nucleación producida durante la fase de recristalización, empieza un proceso de crecimiento de grano, cuya velocidad depende proporcionalmente de la temperatura, pero tiene como impedimento la rigidez de la red, de donde se deduce que para cada temperatura habrá un tamaño máximo para los granos de la microestructura. (Avner, 1995)

En el caso de los aluminios, el recocido permite preparar al material para la aplicación de un tratamiento térmico de envejecimiento, ya que este material tiende a presentar reducción de la dureza y propiedades mecánicas, lo cual mejora con el siguiente tratamiento. (Obando & Sánchez, 2015)

3.1.2 Temple

El temple es un tratamiento térmico en el cual se busca mejorar principalmente la dureza del material mediante un proceso de calentamiento y posterior enfriamiento rápido, en donde debido a la rapidez del enfriamiento, se restringe la dispersión de átomos provocando un arreglo de la microestructura la cual propicia una mayor dureza en el material. (Callister, 2007)

En el temple existen factores que alteran el proceso de endurecimiento tales como la velocidad de enfriamiento, la temperatura, el tiempo de calentamiento, además de los medios de enfriamiento tales como agua, aceites, metales fundidos, entre otros. Estos diferentes medios de enfriamiento buscan principalmente establecer una rapidez con la cual se enfriará el material además de ayudar a que el material no presente fisuras o grietas debido a un enfriamiento muy violento. (Caballero & Figueroa, 2010)

En el proceso de temple se busca variar las características del material, tales como: aumentar la dureza del material y por ende su resistencia mecánica, aumentar la fragilidad del material, disminuir la deformación unitaria y a su vez alterar ciertas propiedades eléctricas, magnéticas o químicas.

Básicamente el proceso de temple consta de tres etapas, en la primera etapa se busca un calentamiento uniforme del material hasta la temperatura de temple de acuerdo al material a ser tratado, esta temperatura debe asegurar que para la aleación establecida sobrepase la curva del solvus del diagrama de fase.

En la segunda etapa se prioriza la homogenización del material mediante el sometimiento de este a una temperatura por un determinado tiempo. En esta etapa se debe mantener al material a dicha temperatura el tiempo necesario a fin de asegurar una homogeneización del material.

Finalmente en la última etapa se procede a un enfriamiento del material, el cual depende del material a ser tratado, por ello se seleccionará un medio de enfriamiento adecuado que garantice un enfriamiento rápido del material evitando que los átomos se logren reordenar y así a su vez llevar a cabo el aumento de la dureza del material. (Tecnosefarad, 2016)

Con la finalidad de realizar el proceso de temple se debe tener algunas consideraciones, por ejemplo en cuanto al tamaño de la pieza a ser tratada sobre todo en cuanto a espesores ya que a mayor espesor se requerirá de un mayor tiempo de calentamiento para llevar a cabo una homogenización del material. Así también, se debe de analizar la viabilidad del temple en la aleación a ser tratada en base a su composición química, ya que algunas aleaciones son más idóneas a este tratamiento en contraparte a otras que no lo son.

En este proceso existe el término templabilidad que es una característica del material la cual define cuán apto o capaz es el material a ser templado en donde bajo parámetros establecidos se somete a una muestra a este proceso y se

analizan los resultados con el fin de comparar que tan templable es el material. (Trateriber, 2016)

3.1.3 Envejecimiento artificial

El endurecimiento por envejecimiento o también conocido por precipitación, es un tipo de tratamiento térmico en el cual se busca una dispersión uniforme de un soluto fino y duro en una matriz blanda y dúctil. En cuanto a las aleaciones de aluminio se pueden observar muchos ejemplos en donde se usa este tipo de tratamiento para mejorar ciertas propiedades del material, esto es evidente en las aleaciones de aluminio que contienen cobre. (Callister, 2007)

Sin embargo, no todas las aleaciones son sujetas a un proceso viable de envejecimiento; no obstante, las aleaciones de aluminio como las analizadas a base de cobre magnesio, titanio y níquel son capaces de cumplir con las siguientes características, tales como:

- Primeramente deben cumplir con una matriz dúctil y blanda además de un soluto o precipitado duro y frágil.
- La aleación debe evitar la formación de esfuerzos residuales durante el enfriamiento; es decir, que esta debe ser templable, de lo contrario no logrará evitar distorsiones y a su vez la presencia de estos esfuerzos.
- La aleación en cuanto a su diagrama de fases debe poseer una sola fase al elevar la temperatura sobre la línea de cambio de fase sólida y al enfriarse debe poseer solo dos tipos de fases en equilibrio.
- Debe ser capaz de formar un precipitado homogéneo.

En el envejecimiento se busca primordialmente llenar los espacios propensos a las dislocaciones mediante el material precipitado, de esta forma se altera la plasticidad del material debido a que las dislocaciones son las que facultan al material a comportarse de dicha manera. A través de esta alteración se genera un endurecimiento del material, en donde para aleaciones de aluminio este método

es uno de los más importantes para así mejorar las propiedades mecánicas del material. (Askeland, Ciencia e Ingeniería de los materiales , 1998)

3.1.4 Revenido

Es un tratamiento térmico que generalmente se aplica después del temple, calentando la pieza a una temperatura inferior al punto crítico del material. El enfriamiento siempre debe ser controlado, pero se puede definir la velocidad en función del mismo: un enfriamiento rápido brinda alta tenacidad al material, mientras que un enfriamiento lento sirve para reducir tensiones internas. Este proceso se caracteriza por disminuir la fragilidad y dureza del material.

Existen tres tipos de revenido: el de baja temperatura sirve para reducir tensiones internas en el material, sin afectar a la dureza del mismo; el revenido de alta temperatura, se aplica con el fin de aumentar la tenacidad del material; y el revenido de estabilización, se aplica para eliminar tensiones internas y, como su nombre lo indica, estabilizar la estructura interna del material. (Aalbert Industries, 2015)

3.2 ENVEJECIMIENTO EN EL ALUMINIO AA6063 Y AA6061

Para poder realizar un proceso de envejecimiento en una aleación de aluminio, es necesario que la misma cumpla con dos requisitos fundamentales: que los elementos aleantes, o solutos, tengan alta solubilidad en el metal base y que la aleación pueda ser sometida a un proceso de temple, ya que este proceso permite aumentar la precipitación en el material.

Este tratamiento térmico generalmente se lleva a cabo entre los 110°C y 200°C, con tiempos de entre 5 y 48 horas, lo cual depende de las propiedades que se desean mejorar en el producto final, ya que los dos factores inciden directamente en la distribución y tamaño de grano de la microestructura. Por otro lado, algunas propiedades tienen comportamiento de cambio inversamente proporcional; es decir, si una mejora, la otra disminuye, tal es el ejemplo de la resistencia

mecánica y la resistencia a la corrosión: el tratamiento térmico hará que la primera aumente, mientras que la segunda se verá disminuída; además, a mayor tiempo de tratamiento térmico, el material experimenta un incremento en la ductilidad. (De Frenza, Leañez, Sáenz, & Caralli D'Ambrosio, 2006)

Las dos aleaciones analizadas contienen magnesio y silicio, por tanto es importante determinar las características de las partículas de cada elemento, con el fin de seleccionar de forma adecuada la temperatura de tratamiento. Con ese mismo objetivo, debe analizarse la composición química de cada aleación, ya que los incrementos de la temperatura contribuyen a una mejor homogeneización de la microestructura del material. (Bohórquez, Sierra Cetina, & Lemus, 2010)

Además, las aleaciones con un contenido de magnesio superior al 1% pueden experimentar una reducción de hasta un 10% en sus propiedades mecánicas, con un tratamiento de envejecimiento durante un tiempo mayor a 24 horas. Por el contrario, las propiedades mecánicas pueden verse mejoradas en las aleaciones cuyo contenido de magnesio sea inferior al 0,9%. (Cavazos García, 1998)

3.2.1 Descripción del proceso

El proceso de envejecimiento tiene principalmente tres etapas, las cuales se pueden apreciar en la figura 3.1.

En la primera etapa se calienta el material hasta una temperatura que garantice la formación de la solución sólida α , tras lo cual mediante dicha temperatura ocurre la disolución del precipitado θ , logrando así una mezcla homogénea con respecto a la aleación inicial. Como se observa en el gráfico anterior se debe elevar la temperatura por encima de la línea de equilibrio entre las soluciones α y $\alpha + \theta$.

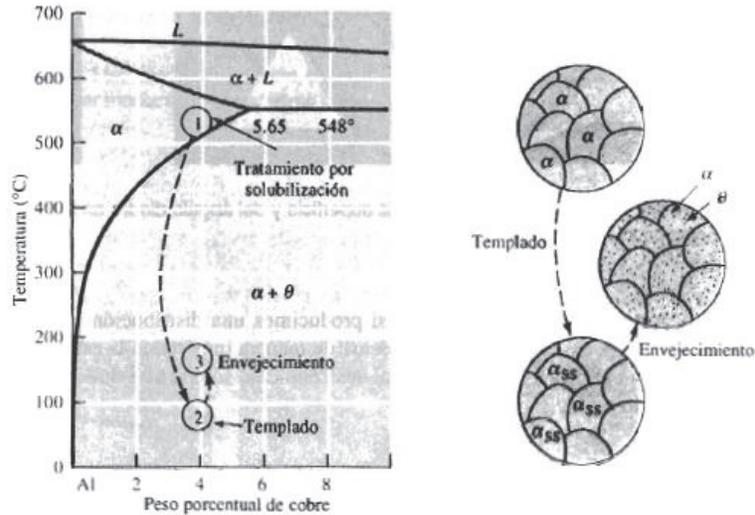


Figura 3.1 - Diagrama de fase para aleación de aluminio y proceso de envejecimiento¹¹

En la segunda etapa de este proceso se procede a una fase de templado o enfriamiento rápido con la finalidad de evitar la difusión de los átomos y mediante aquello evitar la formación de la fase θ . Tras ello se obtiene como resultado una solución sobresaturada inestable, en la cual solo se tiene la fase α . En la figura 3.1 en el lado derecho se puede observar cómo se pasa desde una microestructura donde solo existe la fase α hasta una en donde debido a la velocidad de enfriamiento se origina la misma fase pero sobresaturada.

Finalmente en la última fase se procede en sí al proceso de envejecimiento en la estructura del material mediante la elevación de temperatura del mismo por debajo de la línea de equilibrio anteriormente descrita, la cual permita establecer una difusión a corta distancia de los átomos, provocando así un equilibrio de las fases α y θ . (Askeland, 1998)

¹¹ Askeland, D. (1998). Ciencia e Ingeniería de los materiales . México: International Thomson Editores. Pág. 292.

CAPÍTULO 4

PROCESO DE SOLDADURA GMAW

4.1 GENERALIDADES DEL PROCESO

Este proceso abarca la soldadura de metales bajo protección gaseosa con la finalidad de garantizar una buena soldabilidad. GMAW es el acrónimo para Gas Metal Arc Welding, por sus siglas en inglés, refiriéndose justamente al tipo de protección que se usa para proteger el metal al ser éste fundido y posteriormente solidificado, en este proceso se tiene por característica que se usa un electrodo continuo en forma de rollos de alambre, en donde se pueden encontrar de diferentes tipos de acuerdo al material base que se desea soldar y las características mecánicas que se esperan que cumpla el cordón de soldadura. (Messler, 2004)

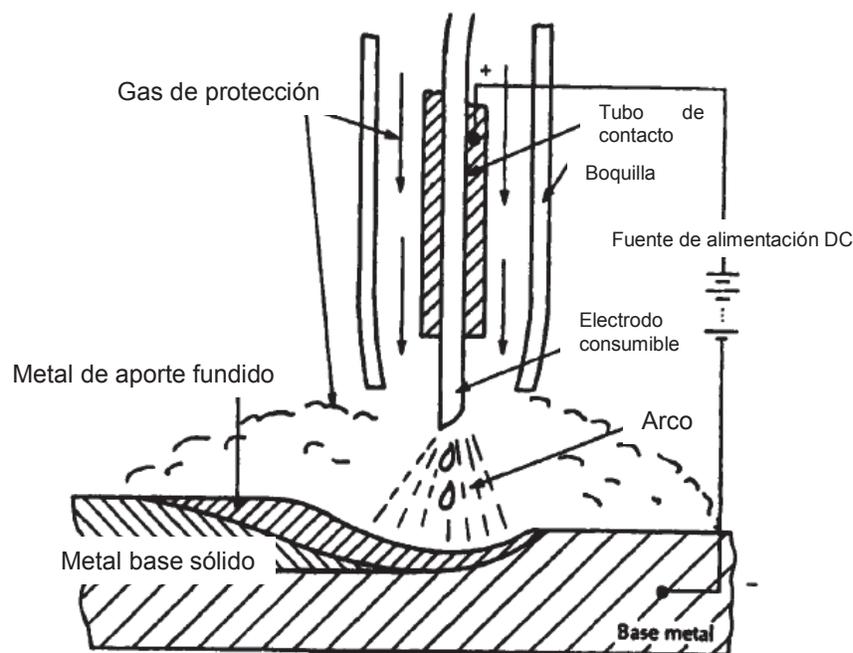


Figura 4.1 – Esquema del proceso GMAW¹²

¹² Messler, R. (2004). *Principles of Welding Processes, Physics, Chemistry, and Metallurgy*. NY: Wiley-Vch. Pág. 62.

El proceso de soldadura para el GMAW se produce mediante un arco eléctrico entre la punta del electrodo continuo y el metal base como se puede observar en la figura 4.1. En este proceso el electrodo puede ser empujado o halado mediante un mecanismo mecánico, para lograr que este se siga alimentando al cordón de manera automática. El electrodo atraviesa un tubo de contacto el cual está conectado al circuito que forma tierra con el metal base, formando así el arco eléctrico. Además se tiene una boquilla, la cual cubre al tubo de contacto y al electrodo y posee la función de proteger la atmósfera en donde se está produciendo la soldadura, gracias a la dispersión de un gas el cual puede ser inerte o activo; la boquilla además cumple con la función de direccionar de manera adecuada la salida del gas con la finalidad de dispersar el gas de cierta manera que produzca una atmósfera de protección acorde al proceso de soldadura realizado. (Kou, 2003)

Dependiendo del tipo de alambre usado y gas de protección el proceso puede usarse para soldar materiales tales como aceros, aceros especiales, aceros inoxidable, aluminios y básicamente cualquier metal comercial.

Este proceso de soldadura principalmente se trata de un proceso semiautomático, ya que la alimentación del electrodo se da de manera automática, en donde el voltaje y amperaje es regulado por la máquina con la finalidad de obtener un arco estable. También este proceso se puede encontrar robotizado en diferentes industrias de manufactura, especialmente en la automovilística, en donde se usan robots que sueldan las diferentes partes de los vehículos usando este tipo de proceso, logrando soldaduras de gran calidad y precisión a gran rapidez, logrando disminuir los tiempos de producción y con mejores resultados en el producto final, aumentando así la fiabilidad y confiabilidad en dichos vehículos.

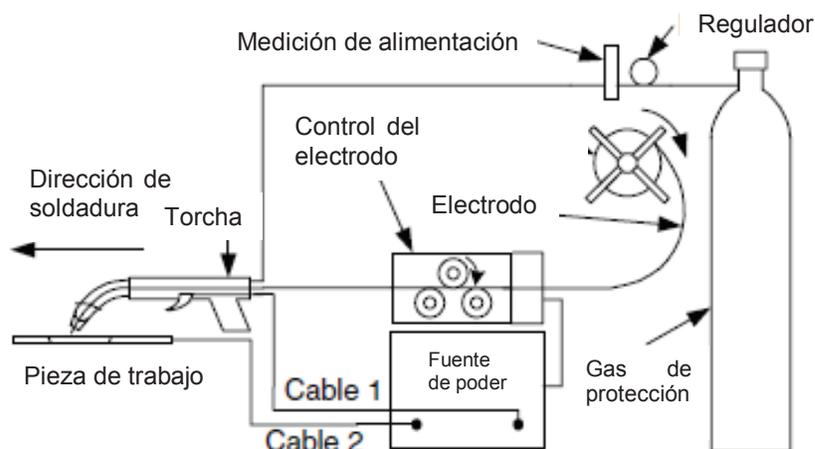


Figura 4.2 – Esquema de las partes del equipo semiautomático GMAW¹³

El equipo más común usado para el proceso GMAW consta básicamente de: tanque o reservorio del gas de protección, seguido de un regulador de caudal conectado al tanque, el cual permite seleccionar el caudal adecuado para la soldadura, cuenta también con una unidad alimentadora del electrodo, fuente de poder y antorcha o pistola. En la figura 4.2 se pueden observar las partes mencionadas para el caso de un equipo semiautomático; cabe mencionar que dichos componentes, a excepción del tanque, pueden ser implementados en equipos muy simples, ligeros y portátiles. En la industria también se encuentran equipos más grandes y con mayor número de funciones pero básicamente con el mismo arreglo de componentes. (Kou, 2003)

4.2 DESCRIPCIÓN DE PROCESOS GMAW – MIG/MAG

Dependiendo de los tipos de gases de protección usados se puede definir específicamente el proceso GMAW en MIG o MAG, para lo cual MIG se refiere al uso de gas inerte como protección, ya sea este Argón o una mezcla de Argón y Helio. Para el caso del proceso MAG simplemente varía el gas de protección el cual para este caso es CO₂. Cabe señalar que ambos procesos MIG y MAG son

¹³ Kou, S. (2003). *Welding Metallurgy*. New Jersey: Wiley-Interscience. Pág. 23.

básicamente el mismo, salvo el diferente uso de gas de protección. Sin embargo, existen diferentes tipos de alambres con diferentes diámetros y diferentes aplicaciones dependiendo del material o pieza que se desea soldar; por ejemplo, en el caso de MIG se recomienda este tipo de proceso para la soldadura de metales reactivos tales como el aluminio, magnesio o titanio. Por otra parte, para el caso del MAG se lo orienta más al uso en soldadura de metales menos reactivos. (Kou, 2003)

4.3 TIPOS DE TRANSFERENCIA

Una de las grandes ventajas del proceso GMAW es que mediante la modificación de ciertas variables tales como gas de protección, corriente, voltaje, velocidad de alimentación, entre otras, se puede obtener diferentes tipos de transferencia de material de aporte. (Messler, 2004)

Diversos autores describen varios tipos de transferencia del material de aporte; sin embargo, los tipos de transferencia se pueden resumir a los tres principales, mediante los cuales se logra la transferencia de material. Se cuenta con la transferencia globular, del tipo spray y de corto circuito. (Kou, 2003)

En cuanto al tipo globular, se produce la transferencia de material mediante la formación de gotas en tamaños cercanos al diámetro del material de aporte y mayores a éste. Este tipo de transferencia se puede dar para ambos tipos de soldadura GMAW ya sea MIG o MAG, debido a una baja corriente. La transferencia globular sin embargo no es muy estable y propicia la aparición de salpicaduras en el cordón de soldadura. (Kou, 2003)

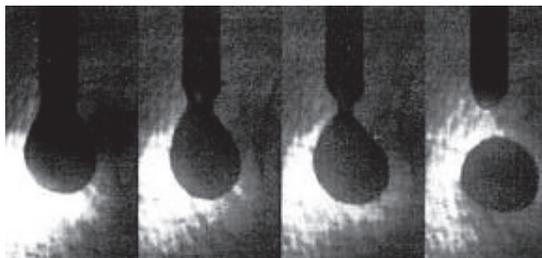


Figura 4.3 – Transferencia de tipo globular¹⁴

En la transferencia del tipo Spray, se originan pequeñas gotas de material de aporte que pasan por el arco eléctrico hacia el metal base a gran velocidad, impulsadas debido a la fuerza electromagnética generada por el arco, lo cual produce una gran tasa de transferencia. Este proceso se produce cuando la corriente supera el nivel crítico de operación para el electrodo. (Kou, 2003)

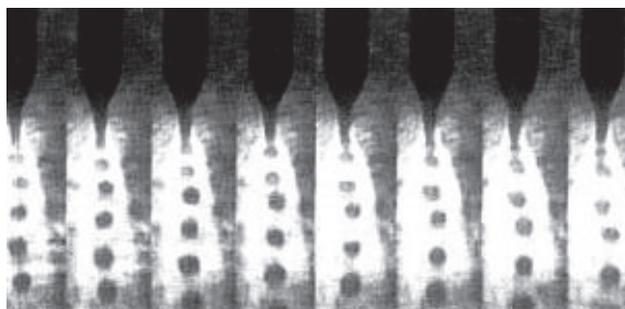


Figura 4.4 – Transferencia de tipo spray¹⁵

Por otra parte la transferencia de tipo corto circuito se origina cuando el electrodo toca la superficie del charco de metal fundido en el metal base, produciendo la transferencia de material, esto se produce cuando existe una baja corriente de soldadura en diámetros pequeños de electrodos. Este tipo de transferencia es recomendada para la soldadura de material de pequeños espesores, debido a que la superficie del metal fundido es de rápida solidificación, lo que evita un sobrecalentamiento del material base o perforación del mismo. (Kou, 2003).

Como se mencionó anteriormente los parámetros de operación del equipo determinan el tipo de transferencia del material de aporte, en la tabla 4.1 se puede

¹⁴ Kou, S. (2003). *Welding Metallurgy*. New Jersey: Wiley-Interscience. Pág. 21

¹⁵ Kou, S. (2003). *Welding Metallurgy*. New Jersey: Wiley-Interscience. Pág. 21

verificar un rango sugerido para obtener cada tipo de transferencia en base al diámetro del electrodo, corriente y voltaje. Estos valores son referenciales; sin embargo, el tipo de transferencia también depende del tipo de material de aporte usado.

Tabla 4.1 – Tipos de transferencia en base al diámetro del electrodo, amperaje y voltaje

| Modos Ø (mm) | Corto circuito | | Globular | | Spray | |
|-----------------|----------------|-------|----------|-------|---------|-------|
| | A | V | A | V | A | V |
| 0.8 | 50/130 | 14/18 | 110/150 | 18/22 | 140/180 | 23/28 |
| 1.0 | 70/160 | 16/19 | 130/200 | 18/24 | 180/250 | 24/30 |
| 1.2 | 120/200 | 17/20 | 170/250 | 19/26 | 220/320 | 25/32 |
| 1.6 | 150/200 | 18/21 | 200/300 | 22/28 | 260/390 | 26/32 |

Modificado de Eyheralde, pág. 19. (2012)

4.4 VENTAJAS Y DESVENTAJAS DEL PROCESO

El proceso GMAW tiene como ventajas su mayor flexibilidad y versatilidad, debido a la existencia en el mercado de equipos muy pequeños y compactos que facilitan el trabajo en campo. Este proceso, al ser básicamente semiautomático, requiere de menor manipulación y dificultad de operación debido a que factores como la velocidad de alimentación y control del arco son controladas por el equipo.

Este proceso también produce cordones con buena calidad, con mínima presencia de escoria, por lo tanto requiere de menos limpieza post soldadura; tampoco usa fundentes.

Es un proceso muy popular de soldadura en especial para aceros y muy difundido en la industria. Es en su mayoría, aplicable a todos los metales comerciales más importantes, tales como aceros en todas sus formas, aluminios, cobres, magnesios, etc. Son equipos exequibles debido a que se encuentran desde modelos muy simples y pequeños a más grandes y completos, con mayor número de funciones y ayudas.

En cuanto a las desventajas de este proceso, estas se enfocan a la dificultad de acceder a posiciones de soldaduras de difícil acceso, se requiere cierto nivel de experticia y conocimiento para la soldadura de materiales especiales, es susceptible a salpicaduras en la soldadura de ciertos materiales, como ciertas aleaciones de aluminio, tiene limitaciones a ciertas posiciones de soldadura en base al tipo de transferencia que se da en el proceso (globular), también cuenta con la desventaja del desconocimiento y difusión de todas sus aplicaciones en la industria, lo cual hace que no se aproveche en su mayoría todas las ventajas de este proceso. (Kou, 2003) (Messler, 2004)

4.5 APLICACIÓN DEL PROCESO GMAW-MIG A LA SOLDADURA DE ALUMINIOS AA6063 Y AA6061

La creciente utilización de aluminios en la industria, ha obligado a los fabricantes a implementar mejoras en las técnicas de unión para dicho elemento. Por esto, la automatización de los procesos ha permitido la aplicación del proceso MIG en aluminios, para la mayoría de sus aleaciones.

Este proceso, en un principio desarrollado para mejorar la calidad de la soldadura para metales no ferrosos, se ha vuelto muy común también para aceros. Una de las características que lo hacen destacar es el uso de gas de protección, ya que favorece la formación de un cordón con menos impurezas y acumulaciones de escoria, además de protegerlo de la formación de óxidos inmediatamente después de depositado el material de aporte. Para el caso particular del aluminio, el gas de protección más recomendado, ya que el aluminio es bastante reactivo y no puede utilizarse con CO₂, y más ampliamente utilizado en la industria local, es el argón. El caudal de alimentación del gas de protección debe ser mayor que en los aceros, ya que este cordón requiere más cuidados durante su enfriamiento, para evitar la formación de óxidos.

Entre los puntos más relevantes para asegurar una buena calidad en el cordón de soldadura, debe destacarse la limpieza y preparación del material base antes de realizar la soldadura, ya que el aluminio en contacto con el oxígeno genera reacciones rápidas, produciendo una capa de óxido superficial llamada alúmina, por eso es necesario limpiar adecuadamente las superficies y los biseles, en caso de ser necesarios. Es recomendable también verificar el acabado superficial de las piezas a soldar, ya que las que presentan tratamientos de anodizado o galvanizado, van a presentar mayor dificultad para la soldadura. Dentro de la preparación se debe definir si se debe realizar precalentamiento o no, en función del espesor del material y con el fin de asegurar una mejor penetración del material de aporte. De ser necesario, el material base debe calentarse a 100°C aproximadamente, para facilitar la fusión del mismo con el material de aporte.

También es importante tener en cuenta la conductividad térmica y dilatación del aluminio, ya que la primera es cuatro veces mayor que en los aceros, y hace que el calor se disperse rápidamente; y la segunda es el doble que en los aceros, pudiendo presentarse mayor separación de las juntas, por lo que se sugiere hacer puntos previos al cordón final.

El factor de operación, el cual está definido por las características del equipo con el que se va a trabajar, requiere dar cuidado especial a la velocidad de alimentación, ya que el material de aporte que se utiliza para aleaciones de aluminio es bastante dúctil y puede producir bloqueos o trabas en la alimentación de la torcha, impidiendo realizar un cordón uniforme. A su vez, es necesario revisar constantemente el estado del tubo (o boquilla) de contacto, ya que en algunos casos, si se trabaja con un amperaje demasiado alto o con una extensión libre de alambre inadecuada, puede fundirse con el material de aporte y echarse a perder, requiriéndose el cambio del mismo por uno nuevo. (The Lincoln Electric Company, 2016)

4.5.1 Soldabilidad del aluminio AA6063 y AA6061

Los procesos más utilizados para soldar aluminios, en especial las aleaciones comerciales de la serie 6XXX, son TIG y MIG, siendo éste último el menos aplicado en la industria nacional.

Estas aleaciones son del tipo ternario, ya que contienen aluminio-magnesio-silicio como elementos principales, además de otros añadidos para mejorar las propiedades mecánicas. En general, se caracterizan por tener buena resistencia mecánica, resistencia a la corrosión, maquinabilidad y soldabilidad. Sin embargo, son más proclives a sufrir un envejecimiento natural con el paso del tiempo, debido a la precipitación de Mg_2Si , el mismo que puede producir cambios en la estructura cristalina del material, tanto en la dureza superficial como en la resistencia mecánica. A pesar de esto, son ampliamente utilizadas en construcciones de ciudad, tanto en su presentación arquitectónica (por ejemplo, ventanas y paneles) como en su presentación estructural (vigas, correas, etc.)

En el caso del aluminio AA6061, del tipo estructural, en el país se opta por utilizar uniones de pernos, ya que suele presentar complicaciones a la hora de soldar. Es ampliamente utilizado para la construcción de techos de galpones y estructuras que no estén sometidas a mucha carga, ya que en comparación con el acero, no presenta la misma resistencia. (Ortolá, 2009)

El aluminio AA6063 presenta mejor soldabilidad y resistencia a la fluencia que el AA6061, por lo cual es mayormente utilizado en perfilería. Sin embargo, para estas aplicaciones no es muy común utilizar soldadura, sino unión por remaches, ya que la mayoría de presentaciones son de espesores muy delgados.

4.5.1.1 Soldadura en juntas a tope

La selección del tipo de junta depende de la aplicación para la cual se realiza la soldadura, el espesor del material y el equipo con el que se trabaja.

Si se trabaja con espesores pequeños, de 2mm o menos, se puede trabajar directamente sin ninguna otra preparación, cuidando que exista una pequeña ranura de separación entre placas, la cual permita la penetración del material de aporte y su fusión con el material base. Si se desea trabajar con espesores superiores, se recomienda la utilización de biseles.

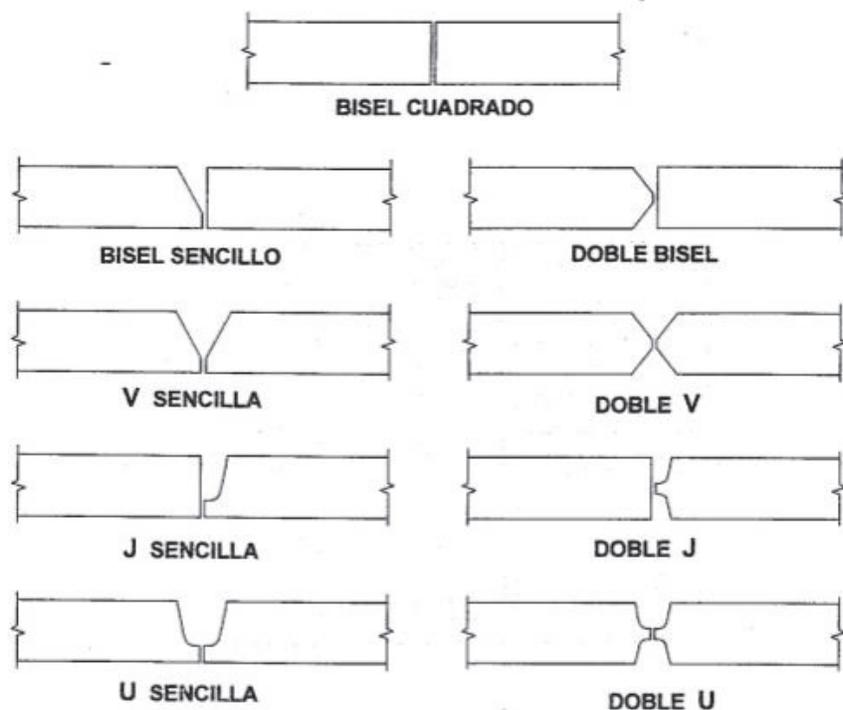


Figura 4.5 – Tipos de biseles para soldadura¹⁶

En soldadura existen muchos tipos de biseles, los cuales se seleccionan de acuerdo a la aplicación. Para el caso de los aluminios AA6063 y AA6061, si no se cuenta con un espesor superior a 5mm, se puede optar por un bisel en V, también conocido como chaflán, el más común para juntas a tope. Para asegurar una mejor penetración, se recomienda realizar el biselado en ambas piezas a soldar, así mejora la calidad y resistencia del cordón de soldadura.

¹⁶ Inspección y sistemas de calidad. (17 de Julio de 2016). *SlideShare*. Obtenido de Inspección de soldadura AWS: <http://es.slideshare.net/clarksuper/aws-curso-de-inspeccion-de-soldadura>



Figura 4.6 – Bisel en V para juntas de espesor superior a 3mm¹⁷

4.6 PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA GMAW-MIG

El proceso MIG se caracteriza por ser semi-automático, ya que mediante un motor interno se encarga de expulsar el material de aporte a una velocidad constante, fijada previamente por el operador, la misma que determinará la velocidad de avance para el cordón de soldadura.

En el caso de requerirse de un operador para el desarrollo de este proceso, es necesario que el mismo sea hábil y tenga práctica; es decir, que sea un soldador calificado, caso contrario no se obtendrán los resultados deseados en el cordón.

Además de la velocidad de alimentación, se requiere fijar otros parámetros con el fin de obtener los mejores resultados en el cordón. Estos deben ser analizados y seleccionados particularmente para cada caso y dependen en mucho del tipo de equipo con el que se esté trabajando.

Para dar comienzo al proceso, lo primero que se debe realizar es la preparación del material base, lo que implica realizar biseles y limpieza previa, para asegurar que la superficie esté lista para recibir el material de aporte, ya que de lo contrario no se obtendrán buenos resultados.

¹⁷ MailxMail. (17 de Julio de 2016). *Curso de Soldadura paso a paso*. Obtenido de <http://www.mailxmail.com/curso-soldadura-arco-manual-electrico-fundamentos/soldadura-tope-chaflan-bisel-simple>

4.6.1 Equipo

En ítems anteriores se detalló algunas características fundamentales del equipo utilizado para el proceso MIG. Cabe añadir que estos equipos, que pueden trabajar en corriente alterna o continua, en polaridad positiva o negativa, tienen varias presentaciones, dependiendo de la casa comercial con la cual se trabaja.

Por ejemplo, a continuación se especifican características propias del modelo EVO 200M, de la marca CEBORA ®, de origen italiano. Este equipo consta de un pequeño motor interno que permite mover un carrete de hasta 15 kg de capacidad, el mismo que gira en función de la velocidad de alimentación asignada por el operador.

Este equipo es apto tanto para MIG como para MAG, ya que permite soldadura de hilo continuo. Requiere una frecuencia de entre 50 y 60 Hz para trabajar correctamente, tanto en alimentación monofásica como trifásica y de característica estática de voltaje constante.

Todos los equipos de soldadura tienen una característica única, que es el factor de servicio porcentual, el cual expresa el porcentaje de tiempo que el equipo puede trabajar dentro de 10 minutos, sin producir recalentamiento. Este factor depende del voltaje y amperaje de trabajo para cada situación particular.

A su vez, el operador puede realizar modificaciones en el voltaje y amperaje de entrada, factores que deben definirse en función del trabajo que se esté realizando, el tipo de material y el espesor del mismo. (Cebora, 2016)



Figura 4.7 – Equipo de soldadura GMAW-MIG, CEBORA ® Evo 200M¹⁸

4.6.2 Parámetros de soldadura

Como en todo proceso, la soldadura GMAW-MIG requiere el análisis de varios parámetros con el fin de obtener buenos resultados. Estas variables se definen en función del material, espesor del mismo, y tipo de material de aporte que se desee utilizar.

Entre los parámetros más destacables, de acuerdo al volumen 6 de ASM International Handbook ® (ASM International, 1993), en la página 575, se encuentran los siguientes:

- Diámetro, composición, velocidad de alimentación y extensión libre del electrodo
- Voltaje y longitud del arco
- Amperaje
- Polaridad
- Gas de protección
- Ángulo de incidencia de la pistola y dirección de soldadura

¹⁸ Cebora. (17 de Julio de 2016). Manual de instrucciones para soldadora de hilo. Bologna, Italia.

Los parámetros anteriormente enlistados influyen directamente en la penetración, geometría y calidad del cordón de soldadura.

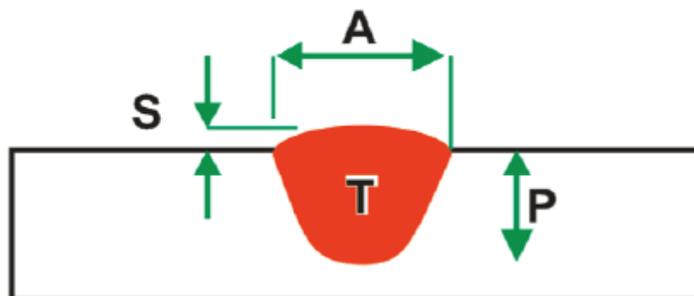


Figura 4.8 – Parámetros de forma del cordón de soldadura¹⁹

El parámetro A representa el ancho del cordón, P la penetración, S el sobre espesor del cordón y T el tamaño del cordón, estos parámetros pueden variar dependiendo de los cambios que se generen en cada uno de ellos.

4.6.2.1 Diámetro, composición, velocidad de alimentación y extensión libre del electrodo

Un elemento importante que se debe tener en consideración es el material de aporte, ya que el mismo debe ser cuidadosamente seleccionado, analizando la composición química de la aleación que se desea soldar, ya que esto determinará lo que se necesita del material de aporte.

En el mercado existen varios tipos de materiales de aporte para la serie 6XXX, los cuales se rigen generalmente bajo la norma AWS 5.10, la misma que clasifica a los materiales de aporte por el proceso de soldadura, resistencia mecánica y otras propiedades. Los más comerciales en el país son ER4043 y ER5356, los mismos que son muy utilizados en la soldadura de las aleaciones AA6061 y AA6063 en el mercado nacional.

¹⁹ Eyheralde, M. (30 de 06 de 2012). *Consejo de Educación Técnico Profesional Universidad del Trabajo del Uruguay*. Recuperado el 17 de 07 de 2016, de Campus Virtual CETP/UTU: <http://campusvirtual.edu.uy/archivos/mecanica-general/soldadura/09%20Proceso%20GMAW%20FCAW.pdf>. Pág. 16.

Recomendaciones para selección de electrodo

| Electrodo y alambre (Clasificación AWS) | Metal base ¹ (Designación Aluminum Association) ² |
|--|--|
| ER1100, R1100, ER1188, R1188 | 1060, 1100, 1350, or 3003 |
| ER2319, R2319, ER4145, R4145 | 2014, 2219, or 3003 |
| ER4009, R4009, ER4010, R4010 R4011, ER4043, R4043 ER4047, R4047, ER4643, R4643 | 3003 or 6061 |
| ER5183, R5183, ER5356, R5356 ER5554, R5554, ER5556 R5556, ER5654, R5654 | { 3004, 5052, 5083, 5086 5154, 5454, or 5456 |
| R-206.0 | 206.0, 2014, 2219, or 3003 |
| R-C355.0 | 355.0, C355.0, or 3003 |
| R-A356.0, R357.0, R-A357.0 | { 356.0, A356.0, 357.0, A357.0, or 3003 |

Figura 4.9 – Recomendaciones de la AWS para la selección del electrodo de acuerdo al metal base²⁰

La extensión libre del electrodo es la longitud de alambre existente entre la boquilla o tubo de contacto y la pieza a ser soldada. La velocidad de alimentación es la velocidad de salida del alambre desde el carrete que está dentro del equipo, hasta el tubo de contacto para la soldadura. A continuación se detallan los efectos de los cambios en el electrodo, en el cordón de soldadura.

Tabla 4.2 – Efecto de los cambios relativos al electrodo en el cordón de soldadura

| | Cambios esperados | | | | | | | |
|----------------------------------|-------------------|----------|--------------------|-----------|-------------------|-----------------|------------------|-----------------|
| | Penetración | | Tasa de deposición | | Tamaño del cordón | | Ancho del cordón | |
| | Aumento | Descenso | Aumento | Descenso | Aumento | Descenso | Aumento | Descenso |
| Velocidad de alimentación | Aumento | Descenso | Aumento | Descenso | Aumento | Descenso | Poca afectación | Poca afectación |
| Extensión libre | Descenso | Aumento | Aumento* | Descenso* | Aumento | Descenso | Descenso | Aumento |
| Diámetro | Descenso | Aumento | Descenso | Aumento | Poca afectación | Poca afectación | Poca afectación | Poca afectación |

(*) Puede lograrse el efecto deseado si el amperaje se mantiene constante mediante cambios en la velocidad de alimentación

Modificado de ASM International Handbook, pág. 575 (ASM International, 1993)

²⁰ American Welding Society. (15 de Diciembre de 2002). Specification for Bare Aluminum and Aluminum Alloy Welding Electrodes and Rods. Estados Unidos.

Un cambio en la velocidad de alimentación, provocará cambios en el cordón de acuerdo al siguiente figura.

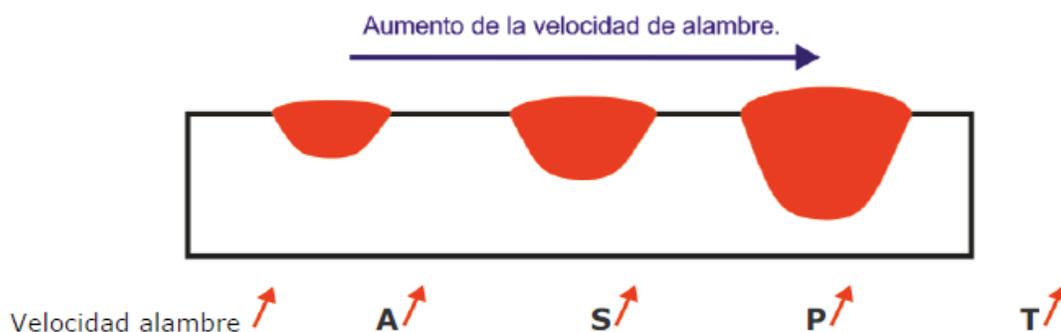


Figura 4.10 – Cambio de forma del cordón con aumento de la velocidad de alimentación²¹

Como se observa en la figura 4.10 un aumento de la velocidad de alimentación de alambre, que conlleva un aumento en la corriente, genera un aumento en todos los parámetros de forma del cordón.

Si se produce un cambio en la velocidad de avance, un aumento en dicho parámetro provocará una reducción en todos los parámetros de forma del cordón, tal como se puede observar en la figura 4.11, en donde tanto ancho, penetración, sobre espesor y tamaño del cordón se ven disminuidos.

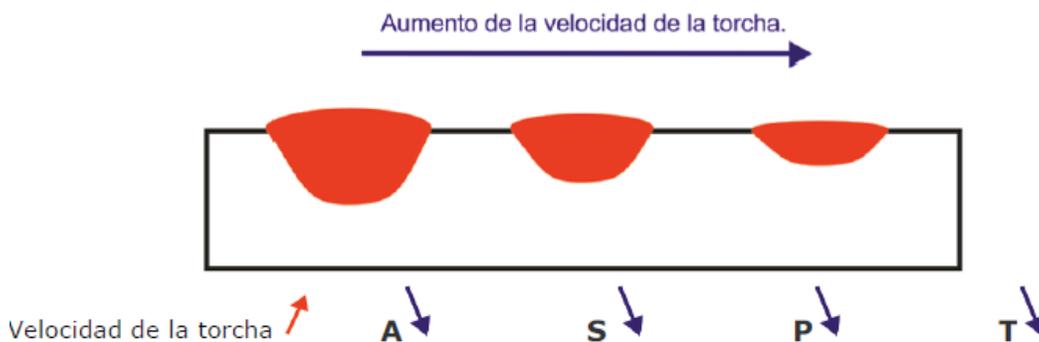


Figura 4.11 – Cambio de forma del cordón con un aumento de velocidad de avance²²

²¹ Eyheralde, M. (30 de 06 de 2012). *Consejo de Educación Técnico Profesional Universidad del Trabajo del Uruguay*. Recuperado el 17 de 07 de 2016, de Campus Virtual CETP/UTU: <http://campusvirtual.edu.uy/archivos/mecanica-general/soldadura/09%20Proceso%20GMAW%20FCAW.pdf>. Pág. 17.

4.6.2.2 Voltaje y longitud del arco

El voltaje de arco es el voltaje eléctrico con el que trabaja el equipo, y depende del gas de protección, el amperaje y la extensión libre del electrodo; de esta variable depende la aparición de poros y salpicaduras.

Por otro lado, la longitud de arco es la variable en la que se debe centrar más interés, ya que de esto depende el espesor del cordón, por ende la penetración. (ASM International, 1993)

Tabla 4.3 – Efecto de los cambios relativos al voltaje en el cordón de soldadura

| Cambios esperados | | | | | | | | |
|-------------------|----------|--------------------|-----------------|-------------------|-----------------|------------------|----------|----------|
| Penetración | | Tasa de deposición | | Tamaño del cordón | | Ancho del cordón | | |
| Aumento | Descenso | Aumento | Descenso | Aumento | Descenso | Aumento | Descenso | |
| Voltaje | N/A | N/A | Poca afectación | Poca afectación | Poca afectación | Poca afectación | Aumento | Descenso |

Modificado de ASM International Handbook, pág. 575 (ASM International, 1993)

Cuando ocurre una variación en el voltaje, un aumento del mismo tendrá como efecto un aumento del ancho del cordón y disminución en los restantes parámetros, como lo descrito en la figura 4.12.

²² Eyheralde, M. (30 de 06 de 2012). *Consejo de Educación Técnico Profesional Universidad del Trabajo del Uruguay*. Recuperado el 17 de 07 de 2016, de Campus Virtual CETP/UTU: <http://campusvirtual.edu.uy/archivos/mecanica-general/soldadura/09%20Proceso%20GMAW%20FCAW.pdf>. Pág. 17.

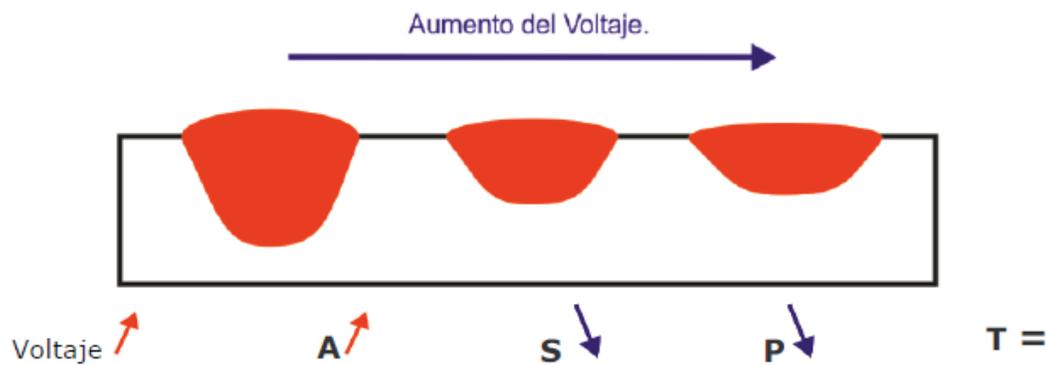


Figura 4.12 – Cambio de forma del cordón con un aumento de voltaje²³

4.6.2.3 Amperaje

El amperaje se define de acuerdo al voltaje de la fuente y la longitud del arco, además de la velocidad de alimentación del electrodo. Afecta directamente la penetración que tenga el material de aporte en la junta, además de la apariencia del cordón en general. (ASM International, 1993)

Tabla 4.4 – Efecto de los cambios relativos al amperaje en el cordón de soldadura

| | Cambios esperados | | | | | | | |
|-----------------|-------------------|----------|--------------------|----------|-------------------|----------|------------------|-----------------|
| | Penetración | | Tasa de deposición | | Tamaño del cordón | | Ancho del cordón | |
| | Aumento | Descenso | Aumento | Descenso | Aumento | Descenso | Aumento | Descenso |
| Amperaje | Aumento | Descenso | Aumento | Descenso | Aumento | Descenso | Poca afectación | Poca afectación |

Modificado de ASM International Handbook, pág. 575 (ASM International, 1993)

²³ Eyheralde, M. (30 de 06 de 2012). *Consejo de Educación Técnico Profesional Universidad del Trabajo del Uruguay*. Recuperado el 17 de 07 de 2016, de Campus Virtual CETP/UTU: <http://campusvirtual.edu.uy/archivos/mecanica-general/soldadura/09%20Proceso%20GMAW%20FCAW.pdf>. Pág. 17.

4.6.2.4 Polaridad

La polaridad, en electricidad, está definida por el tipo de conexión que se realiza a la fuente de alimentación. Esto quiere decir, que cuando se conecta al terminal positivo se considera corriente directa (DC); mientras que si sucede lo contrario, se considera corriente alterna (AC). La mayoría de equipos de soldadura por el proceso GMAW utilizan DC, ya que permite obtener mejor calidad y apariencia del cordón, mayor penetración, menos salpicaduras y un arco estable. (ASM International, 1993)

Dentro de la polaridad también se encuentra el tipo de distribución de calor del arco eléctrico, de donde se puede obtener polaridad directa o inversa.

- **Polaridad directa (DC-):** El cable del electrodo es conectado al terminal negativo de la fuente, mientras que el cable de tierra es conectado al polo positivo.
- **Polaridad inversa (DC+):** El cable de tierra es conectado al terminal negativo de la fuente y el cable del electrodo al polo positivo.

4.6.2.5 Gas de protección

Como su nombre lo indica, la función de los gases utilizados en el proceso GMAW es generar una atmósfera que proteja la calidad superficial e interna del cordón en formación, además de contribuir a una mejor fusión entre el material base y el material de aporte. Argón y helio son los gases más comunes para este proceso, siendo el argón el más utilizado. (ASM International, 1993)

El gas de protección que se suministra al momento de la soldadura también es surtido de manera automática simultáneamente con la alimentación del electrodo, para así asegurar una apropiada protección al momento de fundir el material de aporte con el metal base.

Tabla 4.5 – Efecto de los cambios relativos al gas de protección en el cordón de soldadura

| | Cambios esperados | | | | | | | |
|-----------------------|-------------------|----------|--------------------|-----------------|-------------------|-----------------|------------------|----------|
| | Penetración | | Tasa de deposición | | Tamaño del cordón | | Ancho del cordón | |
| | Aumento | Descenso | Aumento | Descenso | Aumento | Descenso | Aumento | Descenso |
| Gas de protección (%) | Aumento | Descenso | Poca afectación | Poca afectación | Poca afectación | Poca afectación | Aumento | Descenso |

Modificado de ASM International Handbook, pág. 575 (ASM International, 1993)

4.6.2.6 Ángulo de incidencia de la pistola y dirección de soldadura

La dirección de la soldadura también influye en la forma del cordón de soldadura, puesto a que se tiene diferentes resultados entre un ángulo de empuje o arrastre, ya que cada tipo de orientación prioriza un parámetro específico de la forma del cordón; por ejemplo, un ángulo de empuje permite un aumento en el ancho del cordón de soldadura a diferencia del resto de parámetros; un ángulo de arrastre en contraparte, prioriza la penetración del cordón. A su vez a mayor ángulo de cada uno de estos tipos de orientación de la soldadura tiene diferentes consecuencias en la forma del cordón. (Eyheralde, 2012)

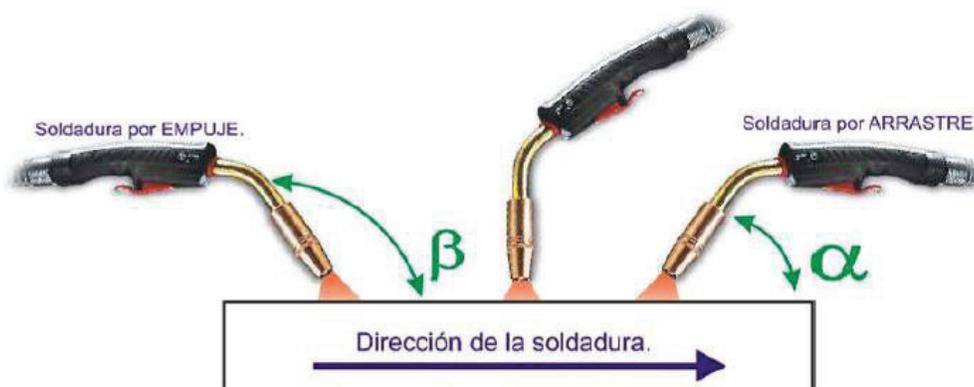


Figura 4. 13 – Tipos de dirección de soldadura e inclinación de la torcha²⁴

²⁴ Eyheralde, M. (30 de 06 de 2012). *Consejo de Educación Técnico Profesional Universidad del Trabajo del Uruguay*. Recuperado el 17 de 07 de 2016, de Campus Virtual CETP/UTU: <http://campusvirtual.edu.uy/archivos/mecanica-general/soldadura/09%20Proceso%20GMAW%20FCAW.pdf>. Pág 17-18

En la figura 4.14 se puede observar la variación de cada uno de los parámetros de soldadura en base a un aumento del ángulo de cada tipo de dirección de soldadura, teniendo patrones de forma muy distintivos entre cada dirección de soldadura. En el caso de un ángulo de empuje un aumento del mismo prioriza un aumento en el ancho de cordón, tal como se observa en la figura, por otro lado un aumento en un ángulo de arrastre de la torcha, genera un aumento en la penetración y tamaño del cordón. (Eyheralde, 2012)

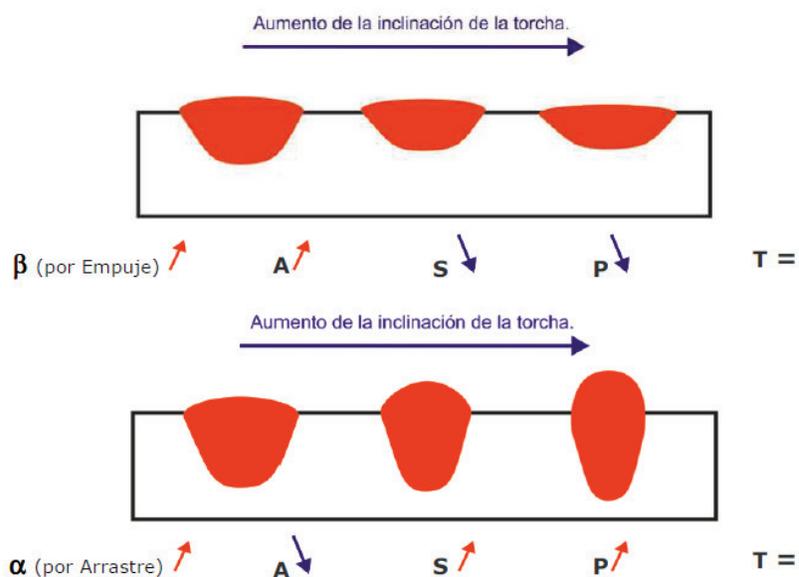


Figura 4.14 – Cambio de forma del cordón con aumento de los ángulos de empuje o arrastre²⁵

En la tabla 4.6 se resumen los posibles cambios que pueden apreciarse en el cordón al realizarse variaciones en el ángulo de incidencia y dirección de soldadura.

²⁵ Eyheralde, M. (30 de 06 de 2012). *Consejo de Educación Técnico Profesional Universidad del Trabajo del Uruguay*. Recuperado el 17 de 07 de 2016, de Campus Virtual CETP/UTU: <http://campusvirtual.edu.uy/archivos/mecanica-general/soldadura/09%20Proceso%20GMAW%20FCAW.pdf>. Pág 17-18

Tabla 4.6 – Efecto de los cambios relativos al ángulo de incidencia de la pistola y dirección de soldadura en el cordón

| | Cambios esperados | | | | | | | |
|------------------------------------|-------------------|----------|--------------------|-----------------|-------------------|-----------------|------------------|----------|
| | Penetración | | Tasa de deposición | | Tamaño del cordón | | Ancho del cordón | |
| | Aumento | Descenso | Aumento | Descenso | Aumento | Descenso | Aumento | Descenso |
| Ángulo de incidencia de la pistola | Arrastre | Empuje | Poca afectación | Poca afectación | Poca afectación | Poca afectación | Empuje | Arrastre |

Modificado de ASM International Handbook, pág. 575 (ASM International, 1993)

4.6.3 Especificación del procedimiento de soldadura

La especificación del procedimiento de soldadura, (Welding Procedure Specification, por sus siglas en inglés), es un documento en el cual se resumen los parámetros que el soldador debe tener en cuenta a la hora de proceder a la realización de un cordón de soldadura.

Dentro de este documento se especifican características tales como bisel, separación de la junta, limpieza y precalentamiento del material base, entre otros; y depende plenamente del material que se desea soldar y el material de aporte que se va a utilizar, ya que este último determina parámetros como el voltaje, amperaje y velocidad de alimentación de la soldadura.

Este documento se califica mediante un PQR (Procedure Qualification Record, por sus siglas en inglés), el mismo que es un registro de calificación del proceso, en el cual debe incluirse los ensayos que se realizaron al cordón para determinar la calidad del mismo.

Existen varios formatos para la elaboración de un WPS; sin embargo, es un documento adaptable a las necesidades de cada proceso, siempre y cuando se cumpla con la presentación de los requisitos principales del mismo, que se muestran a continuación en un formato estándar, el cual es una adaptación del formato utilizado generalmente por la Escuela Politécnica Nacional, en el

Laboratorio de Soldadura, para la realización de procesos de soldadura. (EPN, 2016)

| ESPECIFICACIÓN DE PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA (WPS) | | | | | | | |
|---|-----------------|----------------|--|---|------------------------|-------------------------|----------------------|
| Nombre compañía: | | EPN | | WPS No.: | | EPN-AM-03 | |
| Según norma: | | ASME código IX | | Fecha: | | | |
| | | | | Realizado por: | | | |
| ARTICULO 1. JUNTA UTILIZADA | | | ARTICULO 5. POSICIÓN DE SOLDADURA | | | | |
| Tipo de junta: | | | | Posición de soldadura: | | | |
| Abertura de raíz: | | | | Progresión: | | | |
| Talón: | | | | Técnica: | | | |
| Angulo de ranura: | | | | | | | |
| Placa de respaldo: | | | | ARTICULO 6. PRECALENTAMIENTO | | | |
| Preparar bisel: | | | | Temperatura: | | | |
| ARTICULO 2. METAL BASE | | | Temp. entre pases: | | | | |
| Especificación: | | | | Tiempo entre pases: | | | |
| Espesor: | | | | ARTICULO 7. TECNICA DE SOLDADURA | | | |
| ARTICULO 3. METAL DE APORTE | | | Soldadura de: | | | | |
| Proceso: | | | | Proceso de soldadura: | | | |
| Especificación (SFA) No.: | | | | Tipo de soldadura: | | | |
| Diámetro (mm): | | | | Soldadura a: | | | |
| Denominación AWS: | | | | Cordón de respaldo: | | | |
| Marca: | | | | Pases por lado: | | | |
| ARTICULO 4. GAS DE PROTECCIÓN | | | Número de electrodos: | | | | |
| Tipo: | | | | Cordón recto u oscilante: | | | |
| Caudal: | | | | Limpieza: | | | |
| | | | | ARTICULO 8. NOTAS | | | |
| | | | | | | | |
| | | | | | | | |
| ARTICULO 9. CUADRO DE LAS VARIABLES DE OPERACIÓN | | | | | | | |
| No. De pase | Metal de aporte | | Corriente | | Tensión de trabajo (v) | Vel. De avance (mm/min) | Técnica de soldadura |
| | Clase | Diámetro (mm) | Tipo y polaridad | Intensidad (amperios) | | | |
| 1 | | | | | | | |

Figura 4.15 – Formato estándar de un WPS²⁶

²⁶ EPN. (Abril de 2016). WPS Laboratorio de Soldadura. Quito, Pichincha, Ecuador.

CAPÍTULO 5

PRUEBA EXPERIMENTAL

5.1 DESCRIPCIÓN DE MATERIA PRIMA

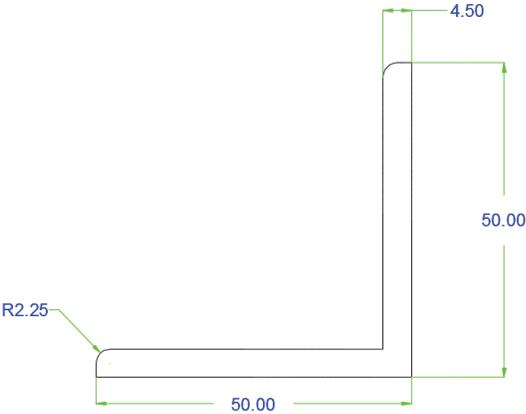
Para llevar a cabo un estudio de la soldabilidad y resistencia mecánica de los aluminios AA6061 y AA6063, se realizó una búsqueda en el mercado nacional de dichas aleaciones, siendo estas encontradas en la empresa Cedal S.A., la cual maneja diferentes tipos de productos, tales como perfiles, tubería, planchas, etc., en aleaciones principalmente 1100, 6005, 6061 y 6063. Las aleaciones 6061 y 6063 son usadas en diferentes aplicaciones dependiendo de las características solicitadas, siendo la aleación 6061 usado primordialmente en aplicaciones estructurales, mientras que la aleación 6063 usado en aplicaciones del tipo arquitectónicas.

5.1.1 Descripción de materia prima de aluminio AA6061

La materia prima de la aleación AA6061 puede ser adquirida en el mercado nacional en diferentes presentaciones, entre las que se encuentra tubería para aplicaciones a alta presión y perfiles estructurales. Sin embargo, planchas o placas de este material no son comercializadas a nivel nacional y debe ser adquirido en una presentación que brinde mayor facilidad para la obtención de probetas según las normas establecidas y así fabricar probetas de las dimensiones necesarias.

El material se puede adquirir en Cedal S.A. Planta Latacunga, en modo de perfiles en ángulo, tal como se detalla en la tabla 5.1 de especificaciones.

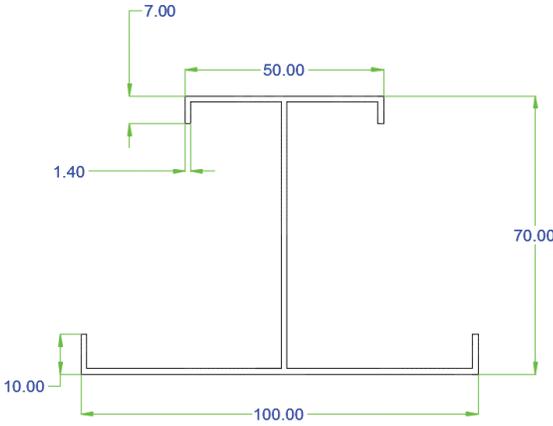
Tabla 5.1 - Descripción de material AA6061

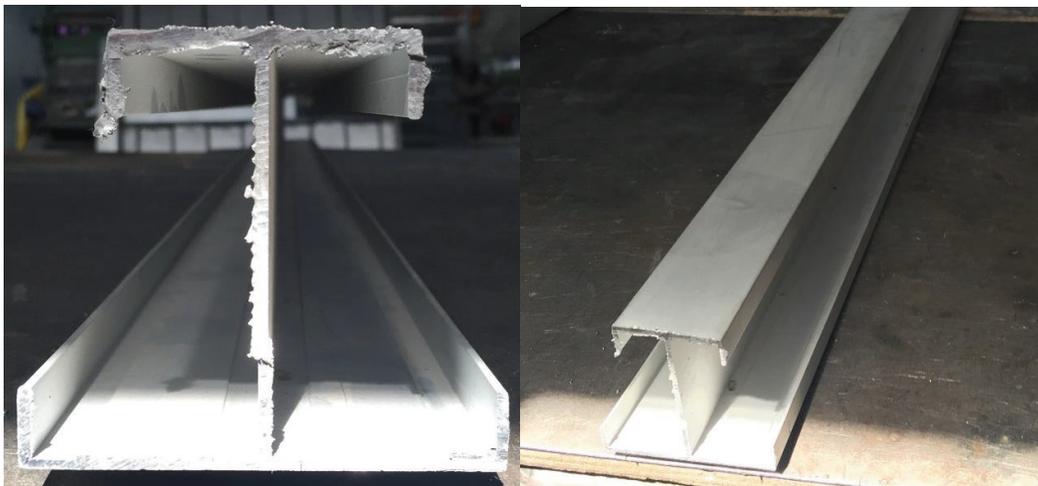
| DESCRIPCIÓN DEL MATERIAL | |
|---|-----------------------------------|
| Tipo de material | Perfil en ángulo de lados iguales |
| Aleación | AA6061 |
| Fabricante | Cedal S.A. |
| Norma del material | ASTM B221 |
| Resistencia mínima a tracción [ksi] | 24 |
| Largo [m] | 6.4 |
| Esquema | |
|  | |
| Figura 5.1 - Esquema perfil en ángulo de lados iguales en aleación AA6061 | |

**Figura 5.2 – Perfil en ángulo de lados iguales en aleación AA6061**

También para este tipo de aleación se puede adquirir perfiles de menor espesor como respaldo, el cual se puede observar en la tabla 5.2.

Tabla 5.2 - Descripción del material AA6061 en menor espesor

| DESCRIPCIÓN DEL MATERIAL | |
|---|------------|
| Tipo de material | Viga en I |
| Aleación | AA6061 |
| Fabricante | Cedal S.A. |
| Norma del material | ASTM B221 |
| Resistencia mínima a tracción [ksi] | 24 |
| Largo [m] | 6 |
| Esquema | |
|  | |
| Figura 5.3 – Esquema viga en I, aleación AA6061 | |

**Figura 5.4** – Perfil aleación AA6061, espesor 1.4 mm

5.1.1.1 Ensayo de espectrometría por chispa para aleación AA6061

Para garantizar que el material adquirido y posteriormente ensayado corresponda a la aleación solicitada, se lleva a cabo un análisis de espectrometría por chispa, así también se verifica que el porcentaje de cada elemento aleante en la muestra cumpla con el rango definido en la norma INEN 2250:2000.

El proceso se lo realiza en el espectrómetro de chispa Foundry-Master perteneciente a la empresa Cedal S.A. Planta Latacunga, al momento de la adquisición de la materia prima. Los resultados de dicho análisis se los puede observar en el ANEXO A de este documento.

5.1.2 Descripción de materia prima de aluminio AA6063

En cuanto a esta aleación, en el mercado existe mucha mayor variedad de productos, ya que nacionalmente las aplicaciones arquitectónicas del aluminio son mucho más desarrolladas en contraparte a las estructurales.

A fin de obtener una mejor calidad de las soldaduras y obtener mejores resultados del material, se busca dicha aleación en espesores que bordeen los 3 milímetros, para lo cual se adquiere un perfil en forma de tubo de sección rectangular, el cual facilita la obtención de probetas gracias a sus caras completamente planas y la gran diferencia de dimensión entre la cara horizontal y la vertical.

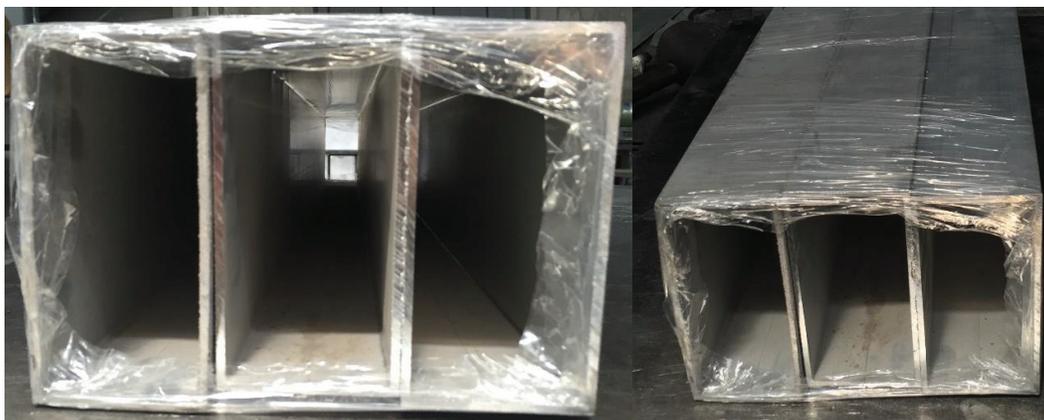
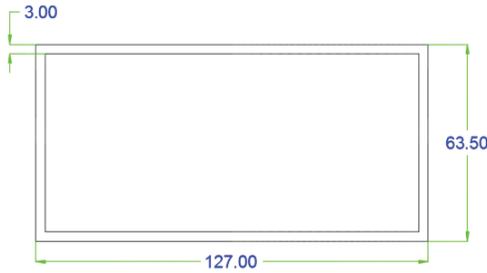


Figura 5.5 – Perfil en forma de tubo rectangular de aleación AA6063

En la tabla 5.3 se muestra las especificaciones del material adquirido para esta aleación.

Tabla 5.3 – Descripción de material AA6063

| DESCRIPCIÓN DEL MATERIAL | |
|--|------------------|
| Tipo de material | Tubo rectangular |
| Aleación | AA6063 |
| Fabricante | Cedal S.A. |
| Norma del material | ASTM B221 |
| Resistencia mínima a tracción [ksi] | 17 |
| Largo [m] | 6 |
| Esquema | |
|  <p>El diagrama muestra un tubo rectangular con un espesor de 3.00 mm, una altura de 63.50 mm y una anchura de 127.00 mm. Las líneas de dimensión están representadas por líneas verdes con flechas azules.</p> | |
| Figura 5.6 Esquema tubo rectangular de aleación 6063. | |

5.1.2.1 Ensayo de espectrometría por chispa para aleación AA6063

Con la finalidad de corroborar que el material adquirido corresponda a la aleación 6063, se realiza también un ensayo de espectrometría por chispa, similar al descrito en el caso del aluminio 6061. Los resultados se comparan con lo establecido en la norma INEN 2250:2000, tras lo cual se determina que el material adquirido corresponde a la aleación en cuestión. En el ANEXO B de este documento, se muestran los resultados para dicho ensayo correspondiente al perfil adquirido.

5.2 DESCRIPCIÓN DEL MATERIAL DE APORTE

La selección de este material se basa en las recomendaciones encontradas para el material de aporte más adecuado de acuerdo al metal base a ser soldado, en este caso los aluminios AA6061 y AA6063.

En la figura 5.7 se describe diferentes clases de materiales de aporte en función del metal base, en donde se puede observar que para la soldadura de juntas correspondientes a la serie 6XXX, se recomienda el uso de los electrodos ER4043, ER5356 y ER4643, los cuales permiten minimizar las fisuras debido a la solidificación y además brindan buenas propiedades mecánicas y resistencia. (Kou, 2003)

Guía para selección de metal de aporte y minimización de grietas de solidificación en soldaduras de aleaciones de aluminio de alta resistencia

| Base Metals | 7000 (Al-Zn-Mg-Cu) | 7000 (Al-Zn-Mg) | 6000 (Al-Mg-Si) | 5000 (Al-Mg) | 2000 (Al-Cu) |
|--------------------|-----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| 2000 (Al-Cu) | NR ^a | NR | NR | NR | 4043 4145 2319 |
| 5000 (Al-Mg) | 5356 | 5356 5556 5183 | 5356 5556 5183 | 5356 5556 5183 | — ^b |
| 6000 (Al-Mg-Si) | 5356 | 5356 5556 5183 | 4043 4643 5356 | — | — |
| 7000 (Al-Zn-Mg) | 5356 | 5356 5556 | — | — | — |
| 7000 (Al-Zn-Mg-Cu) | 5356 5556 | — | — | — | — |

^a NR, no recomendado
^b El fabricante provee fichas técnicas de material de aporte recomendado en función de la aplicación

Figura 5.7 – Guía para selección de material de aporte en función del metal base²⁷

De acuerdo también a la norma ASM volumen 6, en la sección referente a los criterios para selección de material de aporte, recomienda el uso de los electrodos ER4043 y ER5356 para la soldadura de los aluminios 6061 y 6063 bajo el proceso GMAW. (ASM International, 1993)

²⁷ Kou, S. (2003). *Welding Metallurgy*. New Jersey: Wiley-Interscience. Pág. 286.

base para la determinación de las diferentes variables en la soldadura, debido a que son recomendados por el fabricante para así garantizar mejores resultados.

5.3 DESCRIPCIÓN DEL GAS DE PROTECCIÓN

De acuerdo al metal base de la junta (aluminio), el cual corresponde a un metal reactivo, es necesario la selección de un gas de protección inerte, el cual puede ser argón o mezclas de argón con helio, debido a que esto garantiza una adecuada atmósfera de protección para la soldadura de aluminio y promueve la obtención de un cordón de soldadura de buena calidad. (Messler, 2004)

Sin embargo, según el electrodo seleccionado, se eligió como gas de protección el argón al 100%, ya que la ficha técnica del electrodo establece el uso de argón puro como gas de protección. En la figura 5.9 se puede observar el tanque de argón en la versión comercial de 7 metros cúbicos, marca AGA. (Aufhauser Corporation, 2016)



Figura 5.9 – Tanque de argón al 100% de 7 metros cúbicos

Para el caso de la soldadura del metal base con el electrodo seleccionado, en la ficha técnica del mismo aparte de detallar el tipo de gas solicitado también establece el caudal necesario del gas de protección en base al diámetro de

electrodo en donde se establece que debe usarse alrededor de 16 litros por minuto o su equivalencia en sistema inglés, 35 pies cúbicos por hora. (Aufhauser Corporation, 2016)

En el ANEXO D de este documento, se puede observar la ficha técnica del gas seleccionado, además el fabricante establece dentro de las aplicaciones del mismo, que su uso es viable como gas de protección en soldadura de tipo GMAW, ya sea en composición pura o una mezcla del mismo con otros gases para aplicaciones referentes a aluminios. (Linde, 2009)

5.4 PROCESO DE TRATAMIENTO TÉRMICO POR ENVEJECIMIENTO ARTIFICIAL A LOS ALUMINIOS AA6063 Y AA6061

Como ya fue abordado en capítulos anteriores de este escrito, existen varios tipos de tratamientos térmicos que se pueden realizar a los aluminios, entre los que se destacan el temple y el envejecimiento natural o artificial, los mismos que permiten mejorar las propiedades mecánicas del material y de este modo ampliar las aplicaciones del mismo para circunstancias que requieran mayores exigencias en lo que respecta a cargas.

El envejecimiento artificial es el de mayor aplicación en la industria nacional, ya que junto con el temple permite un mejor desempeño del material en aplicaciones estructurales y arquitectónicas, perteneciendo la aleación AA6061 al primer grupo, y la aleación AA6063 al segundo grupo.

Para poder obtener mejores resultados en el tratamiento de envejecimiento, debe tomarse en cuenta parámetros como los elementos aleantes y el tipo de precipitados que forman, además del espesor del material. El primero será el que determine las mejoras en las propiedades mecánicas, mientras que el segundo contribuye a determinar el tiempo necesario de tratamiento.

En el caso de las aleaciones en cuestión, los principales elementos que las constituyen son aluminio, magnesio y silicio, por lo que se convierten en aleaciones del tipo ternario. La presencia de magnesio en la aleación hace que se acentúe el endurecimiento por precipitación, pero al combinarse con silicio, se da paso a la formación de siliciuros de magnesio (Mg_2Si), siendo esta la fase endurecedora del material. Sin embargo, hay que tener especial cuidado con la formación de esta fase, ya que en cantidades demasiado altas, puede conllevar a la fragilización del material. (Bohórquez, Sierra Cetina, & Lemus, 2010)

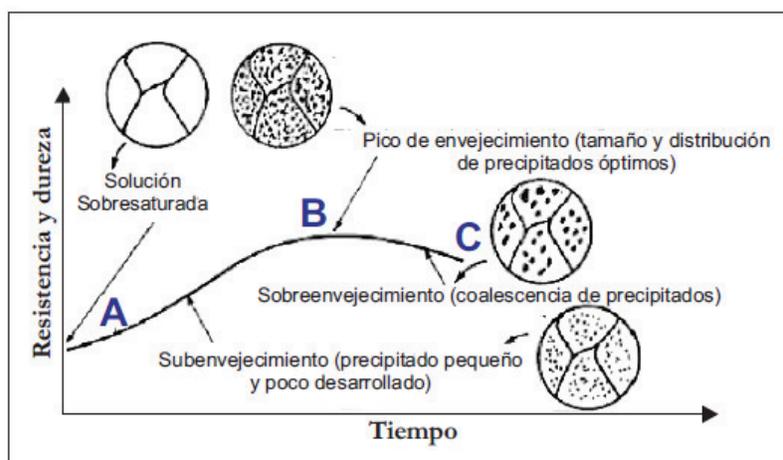


Figura 5.10 – Evolución esquemática de la dureza y resistencia de una aleación de aluminio estructural con endurecimiento²⁸

De acuerdo al ASM International vol. 4, Heat Treating, (Bohórquez, Sierra Cetina, & Lemus, 2010), el tratamiento por envejecimiento puede realizarse en lapsos de entre 4 y 72 horas, con temperaturas comprendidas entre 150°C y 200°C. Este proceso acelera la precipitación de la fase compuesta por siliciuros de magnesio, que de otro modo podría llegar a tomar días o incluso meses.

²⁸ Bohórquez, C., Sierra Cetina, M., & Lemus, J. (2010). Influencia del tratamiento térmico de envejecimiento en las propiedades mecánicas de los aluminios 6061 T6 y 6063 T5. *AVANCES: Investigación en Ingeniería*, 21-25.

Teniendo en cuenta que uno de los objetivos de este estudio es determinar los cambios en la soldabilidad de las aleaciones tratadas con el tratamiento térmico, se realiza el mismo antes de proceder a realizar la soldadura, con lo cual también se puede tomar medidas de dureza y realizar ensayos de tracción antes y después del tratamiento y verificar los cambios que éste produce en las propiedades mecánicas del material.

Para el desarrollo de este trabajo, por recomendación del fabricante se selecciona la temperatura de 185°C, durante 6 horas. Una vez determinado esto, se procede a calcular la velocidad de calentamiento del horno, además de seleccionar el tipo de enfriamiento que se realizará.

Este tratamiento se aplica a las dos aleaciones, con el fin de determinar la forma en la cual se ve afectado el material dependiendo de su composición. Se utiliza el horno tipo mufla del Laboratorio de Tratamientos Térmicos de la Escuela Politécnica Nacional, en el cual se configura la velocidad de calentamiento en 6°C/min, con lo cual se tardó un tiempo de 30 minutos aproximadamente en alcanzar la temperatura deseada y posteriormente realizar el tratamiento durante las 6 horas estipuladas. El enfriamiento se lleva a cabo dentro del horno, con la puerta del mismo abierta.



Figura 5.11 – Horno tipo mufla, marca Vulcan 3-550, Laboratorio de Tratamientos Térmicos, EPN

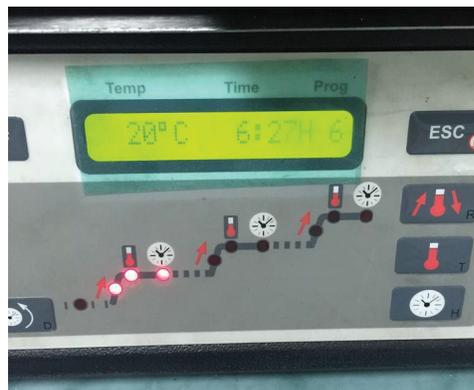


Figura 5.12 – Configuración de tiempo de tratamiento y temperatura



Figura 5.13 – Probetas antes de ser colocadas en el horno de tratamiento



Figura 5.14 – Colocación de las probetas para el tratamiento térmico

Entre los detalles que se deben tener en cuenta para obtener buenos resultados en el tratamiento térmico se encuentran el ubicar ordenadamente las probetas de tal modo que no tiendan a pandear por efecto de la temperatura, además de que no rocen las paredes del horno, ya que esto implicaría una elevación en la temperatura superficial de la probeta. Otro punto importante es procurar que no existan corrientes furtivas de aire que puedan generar cambios por convección en la temperatura de tratamiento y cerrar de forma hermética la puerta del horno para evitar pérdidas de calor hacia el medio ambiente. De igual modo, al elegir el enfriamiento dentro del horno con la puerta abierta, es importante verificar que el horno se haya apagado, ya que este equipo funciona de manera automática, y proceder a abrir la puerta para dar paso al enfriamiento por convección.

5.5 ESPECIFICACIONES DEL PROCESO DE SOLDADURA (WPS) PARA LA SOLDADURA DE JUNTAS DE ALUMINIO AA6061, AA6063 Y MIXTAS

Como se revisó en capítulos anteriores, la especificación del proceso de soldadura es un documento con un compendio de parámetros, adaptados a cada proceso, que permiten al soldador realizar el proceso de forma ordenada y bien dirigida, con el fin de obtener los mejores resultados en la soldadura que se realice.

Los parámetros incluidos en los WPS que se adjuntan a continuación, han sido cuidadosamente seleccionados de acuerdo a lo recomendado por el fabricante del material de aporte elegido para el proceso, de modo que la soldadura pueda llevarse a cabo sin dificultades y cumpliendo las normas requeridas para obtener resultados óptimos.

| ESPECIFICACIÓN DE PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA (WPS) | | | | | | | |
|--|-----------------|----------------------------------|--|-----------------------|------------------------|-------------------------|----------------------|
| Nombre compañía: EPN | | WPS No.: EPN-WPS-AM-01 | | Fecha: 15/06/2016 | | | |
| Según norma: ASME código IX | | Realizado por: Abarca // Marchán | | PQR: EPN-PQR-AM-01 | | | |
| | | Fabricación: Lema | | | | | |
| ARTÍCULO 1. JUNTA UTILIZADA | | | ARTÍCULO 5. POSICIÓN DE SOLDADURA | | | | |
| Tipo de junta: | A tope | | Posición de soldadura: | 1G | | | |
| Abertura de raíz: | 1 (mm) | | Progresión: | Horizontal | | | |
| Talón: | N/A | | Técnica: | Un pase | | | |
| Ángulo de ranura: | 45° | | ARTÍCULO 6. PRECALENTAMIENTO | | | | |
| Placa de respaldo: | N/A | | Temperatura: | N/A | | | |
| Preparar bisel: | Sí | | Temp. entre pases: | N/A | | | |
| ARTÍCULO 2. METAL BASE | | | Tiempo entre pases: | N/A | | | |
| Especificación: | AA6061 | | ARTÍCULO 7. TÉCNICA DE SOLDADURA | | | | |
| Espesor: | 4.5 (mm) | | Soldadura: | Plana | | | |
| ARTÍCULO 3. METAL DE APORTE | | | Proceso de soldadura: | GMAW | | | |
| Proceso: | GMAW | | Tipo de soldadura: | Manual | | | |
| Especificación (SFA) No.: | A5.10 | | Soldadura a: | Un lado | | | |
| Diámetro (mm): | 0,9 | | Cordón de respaldo: | No | | | |
| Denominación AWS: | ER4043 | | Pases por lado: | Simple | | | |
| Marca: | Aufhauser | | Número de electrodos: | Único | | | |
| ARTÍCULO 4. GAS DE PROTECCIÓN | | | Cordón recto u oscilante: | Recto | | | |
| Tipo: | Argón | | Limpieza: | Cepillo | | | |
| Caudal: | 16 (l/min) | | ARTÍCULO 8. NOTAS | | | | |
| | | | 1. Velocidad de alimentación del electrodo de 360-470 in/min | | | | |
| ARTÍCULO 9. CUADRO DE LAS VARIABLES DE OPERACIÓN | | | | | | | |
| No. De pase | Metal de aporte | | Corriente | | Tensión de trabajo (v) | Vel. De avance (mm/min) | Técnica de soldadura |
| | Clase | Diámetro (mm) | Tipo y polaridad | Intensidad (amperios) | | | |
| 1 | ER4043 | 0,9 | DC+ | 130-170 | 24-25 | 210-230 | Oscilatorio |

| ESPECIFICACIÓN DE PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA (WPS) | | | | | | | |
|--|-----------------|----------------------------------|------------------|-----------------------------------|------------------------|-------------------------|----------------------|
| Nombre compañía: EPN | | WPS No.: EPN-WPS-AM-02 | | Fecha: 15/06/2016 | | | |
| Según norma: ASME código IX | | Realizado por: Abarca // Marchán | | PQR: EPN-PQR-AM-02 | | Jorge Lema | |
| Fabricación: Lema | | | | | | | |
| ARTÍCULO 1. JUNTA UTILIZADA | | | | ARTÍCULO 5. POSICIÓN DE SOLDADURA | | | |
| Tipo de junta: A tope | | Abertura de raíz: 1 (mm) | | Posición de soldadura: 1G | | Progresión: Horizontal | |
| Talón: N/A | | Ángulo de ranura: 30° | | Técnica: Un pase | | | |
| Placa de respaldo: N/A | | Preparar bisel: Sí | | ARTÍCULO 6. PRECALENTAMIENTO | | | |
| ARTÍCULO 2. METAL BASE | | | | Temperatura: N/A | | | |
| | | | | Temp. entre pases: N/A | | | |
| | | | | Tiempo entre pases: N/A | | | |
| Especificación: AA6063 | | Espesor: 3 (mm) | | ARTÍCULO 7. TÉCNICA DE SOLDADURA | | | |
| ARTÍCULO 3. METAL DE APORTE | | | | Soldadura: Plana | | | |
| Proceso: GMAW | | Especificación (SFA) No.: A5.10 | | Proceso de soldadura: GMAW | | | |
| Diámetro (mm): 0,9 | | Denominación AWS: ER4043 | | Tipo de soldadura: Manual | | | |
| Marca: Aufhauser | | | | Soldadura a: Un lado | | | |
| ARTÍCULO 4. GAS DE PROTECCIÓN | | | | Cordón de respaldo: No | | | |
| Tipo: Argón 100% | | Caudal: 16 (l/min) | | Pases por lado: Simple | | | |
| | | | | Número de electrodos: Único | | | |
| | | | | Cordón recto u oscilante: Recto | | | |
| | | | | Limpieza: Cepillo | | | |
| ARTÍCULO 8. NOTAS | | | | | | | |
| 1. Velocidad de alimentación del electrodo de 250-360 in/min | | | | | | | |
| ARTÍCULO 9. CUADRO DE LAS VARIABLES DE OPERACIÓN | | | | | | | |
| No. De pase | Metal de aporte | | Corriente | | Tensión de trabajo (v) | Vel. De avance (mm/min) | Técnica de soldadura |
| | Clase | Diámetro (mm) | Tipo y polaridad | Intensidad (amperios) | | | |
| 1 | ER4043 | 0,9 | DC+ | 90-130 | 23-24 | 210-230 | Oscilatorio |

| ESPECIFICACIÓN DE PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA (WPS) | | | | | | | |
|--|--------------------|----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------|------------------------|-------------------------|----------------------|
| Nombre compañía: EPN | | WPS No.: EPN-WPS-AM-03 | | Fecha: 15/06/2016 | | | |
| Según norma: ASME código IX | | Realizado por: Abarca // Marchán | | PQR: EPN-PQR-AM-03 | | | |
| | | Fabricación: Lema | | | | | |
| ARTÍCULO 1. JUNTA UTILIZADA | | | ARTÍCULO 5. POSICIÓN DE SOLDADURA | | | | |
| Tipo de junta: | A tope | | Posición de soldadura: | 1G | | | |
| Abertura de raíz: | 1 (mm) | | Progresión: | Horizontal | | | |
| Talón: | N/A | | Técnica: | Un pase | | | |
| Angulo de ranura: | 45° AA6061 // 30° | | | | | | |
| Placa de respaldo: | AA6063 | | | | | | |
| Preparar bisel: | N/A | | | | | | |
| | | Sí | | | | | |
| ARTÍCULO 2. METAL BASE | | | ARTÍCULO 6. PRECALENTAMIENTO | | | | |
| Especificación: | AA6061 y AA6063 | | Temperatura: | N/A | | | |
| Espesor: | 4.5 (mm) // 3 (mm) | | Temp. entre pases: | N/A | | | |
| | | | | Tiempo entre pases: | N/A | | |
| ARTÍCULO 3. METAL DE APORTE | | | ARTÍCULO 7. TECNICA DE SOLDADURA | | | | |
| Proceso: | GMAW | | Soldadura: | Plana | | | |
| Especificación (SFA) | A5.10 | | Proceso de soldadura: | GMAW | | | |
| No.: | 0,9 | | Tipo de soldadura: | Manual | | | |
| Diámetro (mm): | ER4043 | | Soldadura a: | Un lado | | | |
| Denominación AWS: | Aufhauser | | Cordón de respaldo: | No | | | |
| Marca: | | | Pases por lado: | Simple | | | |
| | | | | Número de electrodos: | Único | | |
| Tipo: | Argón | | Cordón recto u oscilante: | Recto | | | |
| Caudal: | 100% | | Limpeza: | Cepillo | | | |
| | | 16 (l/min) | | | | | |
| ARTÍCULO 8. NOTAS | | | | | | | |
| 1. Velocidad de alimentación del electrodo de 360-470 in/min | | | | | | | |
| ARTÍCULO 9. CUADRO DE LAS VARIABLES DE OPERACIÓN | | | | | | | |
| No. De pase | Metal de aporte | | Corriente | | Tensión de trabajo (v) | Vel. De avance (mm/min) | Técnica de soldadura |
| | Clase | Diámetro (mm) | Tipo y polaridad | Intensidad (amperios) | | | |
| 1 | ER4043 | 0,9 | DC+ | 140 | 24 | 230-260 | Oscilatorio |

| ESPECIFICACIÓN DE PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA (WPS) | | | | | | | |
|--|-----------------|----------------------------------|---|-----------------------|------------------------|-------------------------|----------------------|
| Nombre compañía: EPN | | WPS No.: EPN-WPS-AM-04 | | Fecha: 15/06/2016 | | | |
| Según norma: ASME código IX | | Realizado por: Abarca // Marchán | | PQR: EPN-PQR-AM-01 | | | |
| | | Fabricación: Lema | | | | | |
| ARTÍCULO 1. JUNTA UTILIZADA | | | ARTÍCULO 5. POSICIÓN DE SOLDADURA | | | | |
| Tipo de junta: | A tope | | Posición de soldadura: | 1G | | | |
| Abertura de raíz: | 1 (mm) | | Progresión: | Horizontal | | | |
| Talón: | N/A | | Técnica: | Un pase | | | |
| Ángulo de ranura: | N/A | | ARTÍCULO 6. PRECALENTAMIENTO | | | | |
| Placa de respaldo: | N/A | | Temperatura: | N/A | | | |
| Preparar bisel: | Sí | | Temp. entre pases: | N/A | | | |
| ARTÍCULO 2. METAL BASE | | | Tiempo entre pases: | N/A | | | |
| Especificación: | AA6061 | | ARTÍCULO 7. TECNICA DE SOLDADURA | | | | |
| Espesor: | 1.4 (mm) | | Soldadura: | Plana | | | |
| ARTÍCULO 3. METAL DE APORTE | | | Proceso de soldadura: | GMAW | | | |
| Proceso: | GMAW | | Tipo de soldadura: | Manual | | | |
| Especificación (SFA) No.: | A5.10 | | Soldadura a: | Un lado | | | |
| Diámetro (mm): | 0,9 | | Cordón de respaldo: | No | | | |
| Denominación AWS: | ER4043 | | Pases por lado: | Simple | | | |
| Marca: | Aufhauser | | Número de electrodos: | Único | | | |
| ARTÍCULO 4. GAS DE PROTECCIÓN | | | Cordón recto u oscilante: | Recto | | | |
| Tipo: | Argón 100% | | Limpieza: | Cepillo | | | |
| Caudal: | 16 (l/min) | | ARTÍCULO 8. NOTAS | | | | |
| 1. Velocidad de alimentación del electrodo de 250-360 in/min | | | | | | | |
| ARTÍCULO 9. CUADRO DE LAS VARIABLES DE OPERACIÓN | | | | | | | |
| No. De pase | Metal de aporte | | Corriente | | Tensión de trabajo (v) | Vel. De avance (mm/min) | Técnica de soldadura |
| | Clase | Diámetro (mm) | Tipo y polaridad | Intensidad (amperios) | | | |
| 1 | ER4043 | 0,9 | DC+ | 90-130 | 23-24 | 270-290 | Oscilatorio |

5.6 SOLDADURA DE ALEACIONES AA6061 Y AA6063

La serie 6XXX de los aluminios se caracteriza por tener una buena soldabilidad y maquinabilidad. Sin embargo, se debe tomar en cuenta ciertas consideraciones al momento de comenzar el proceso.

El primer paso es la elaboración del WPS, el cual se detalla en ítems anteriores. Este documento asegura mayor precisión en la fabricación del cordón si se eligen adecuadamente los parámetros que rigen la soldadura.

Una vez que este documento ha sido elaborado, el soldador tiene conocimiento completo de las directrices que debe seguir para poder fabricar un cordón que cumpla con las normas requeridas.

Dentro del WPS se indica si se debe realizar biseles o no en las partes a soldar, el cual debe realizarse de acuerdo a lo que estipulan las normas, las mismas que se definen de acuerdo al espesor de la probeta. Además, en este mismo documento se precisan las herramientas que se deben utilizar para la limpieza de la superficie.

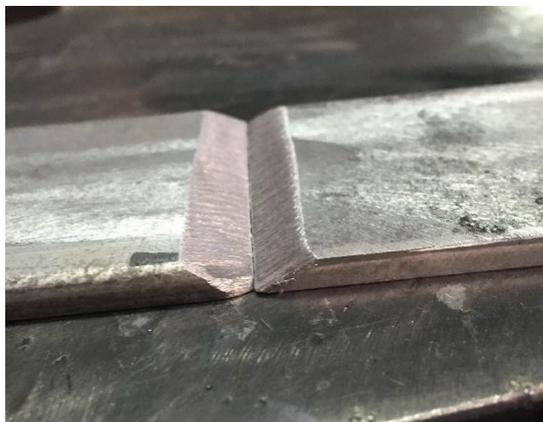


Figura 5.15 – Bisel a 45° en AA6061



Figura 5.16 – Cordón de soldadura

Una vez que se ha elaborado el cordón de soldadura, se procede con la limpieza del mismo, con el objetivo de remover impurezas que puedan aparecer en la superficie del cordón. Para este trabajo en particular, se utiliza un cepillo de acero inoxidable para la limpieza del cordón. Sin embargo, no se recomienda la utilización del cepillo porque puede lastimar la superficie de la soldadura, teniendo en cuenta que el aluminio es un material que se raya con facilidad.



Figura 5.17 – Limpieza del cordón con cepillo de acero

Las aleaciones AA6063 y AA6061 tienen un comportamiento diferente en lo que respecta a soldadura. Mientras que la primera es fácil de soldar, por tener un comportamiento dúctil y menos tendencia a la fragilización, la segunda se caracteriza por ser todo lo contrario. Durante todo el proceso de soldadura de la aleación AA6061 se apreció varios problemas, tales como mayor presencia de salpicaduras y menos fusión entre el metal base y el material de aporte.

5.7 MAQUINADO Y PREPARACIÓN DE PROBETAS

Con el fin de cumplir los requerimientos establecidos en el WPS, se procede a la preparación de los biseles en las probetas, la limpieza de las superficies y la ubicación de la junta.



Figura 5.18 – Preparación de las probetas

Así mismo, después de haber efectuado la soldadura, se procede a la preparación de las probetas para los ensayos que se realizarán, siendo estos tracción, dureza, doblado de cara y raíz y Houldcroft.

La preparación de las probetas de tracción se realiza de acuerdo a las indicaciones de ASME código IX, y se especifica más adelante, en el apartado correspondiente a ensayos de tracción.

Para el ensayo de doblado de cara y raíz, se utilizó lo establecido en las normas de ASME código IX, donde se establecen los tamaños mínimos que se necesita para las probetas. (ASME, 2010)

QW-462.3(a) DOBLADO TRANSVERSAL DE CARA Y RAÍZ

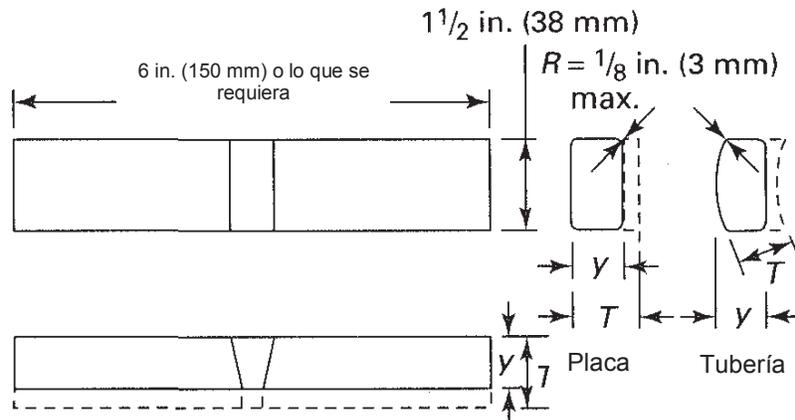


Figura 5.19 – Especificaciones de ASME código IX para probetas de doblado de cara y raíz²⁹

En la figura anterior se observa los requerimientos mínimos en dimensión para las probetas de doblado de cara y raíz. Estas probetas, al principio divididas en dos partes, se sueldan y luego se procede a realizar un maquinado del cordón, de tal modo que desaparezca la sobremonta del cordón, tanto por el lado de la cara como por el lado de la raíz. Una vez que se ha realizado este procedimiento, se puede realizar el ensayo de doblado de cara y raíz, el cual permitirá verificar la calidad del cordón, penetración y fusión entre el material base y el material de aporte.

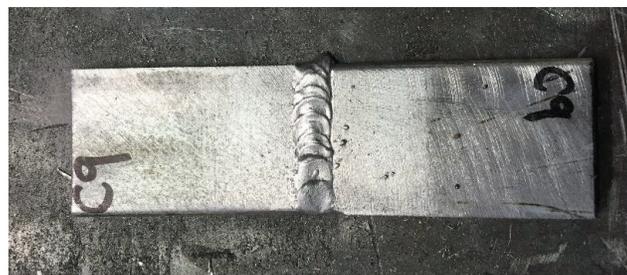


Figura 5.20 – Probeta para ensayo de doblado de cara, antes de realizar el maquinado del cordón

²⁹ ASME. (2010, Julio 1). Qualification Standard for Welding and Brazing Procedures, Welders, Brazers and Welding and Brazing Operators. Nueva York, Nueva York, Estados Unidos.

La preparación de las probetas para el ensayo Houldcroft es un proceso más complejo, ya que implica la realización de ranuras a distancias específicas en las placas, además de la correspondiente preparación del bisel para la soldadura. (Kolarik, Kovanda, Valova, Vondrous, & Dunovsky, 2011)

| Weldability method | W | W ₁ | W ₂ | w | L | l ₁ | l ₂ | P | G | t |
|--------------------|------|----------------|----------------|-----|-----|----------------|----------------|-----|---|---|
| GTAW (TIG) | 44.6 | 22.3 | 19 | 6,4 | 76 | 6 | 70 | 8,5 | 1 | 2 |
| GMAW (MIG) | 140 | 70 | 60 | 20 | 240 | 20 | 220 | 23 | 3 | 6 |

Table 3. Dimensions of Houldcroft test [Hrivnak, 2009]

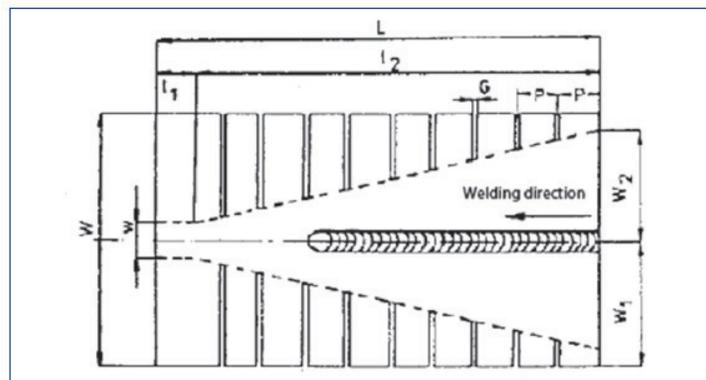


Figura 5.21 – Dimensiones de las probetas Houldcroft³⁰



Figura 5.22 – Probetas de AA6061 preparadas para el ensayo Houldcroft

³⁰ Kolarik, L., Kovanda, K., Valova, M., Vondrous, P., & Dunovsky, J. (2011, Mayo). Weldability test of precipitation hardenable aluminum alloy 6082T6. Praga, República Checa.

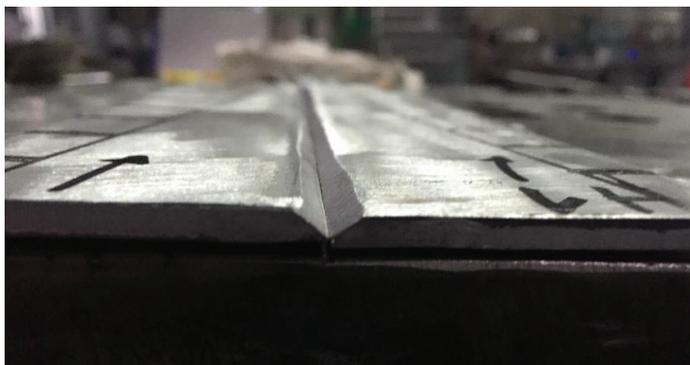


Figura 5.23 – Bisel de probeta Houldcroft de aleación AA6061

5.8 ANÁLISIS DE RESISTENCIA MECÁNICA DE LOS ALUMINIOS AA6063 Y AA6061

La resistencia mecánica es una propiedad que define cuánta carga soportará un material antes de presentar una fractura, esto sucede cuando el mismo ha sobrepasado su límite elástico y ha sido sobre esforzado a tal punto que se inicia un pequeño concentrador de esfuerzos, lo cual desemboca en una fractura, la cual puede ser dúctil o frágil dependiendo del tipo de material y de la composición química del mismo.

La aleación AA6061 tiene una resistencia a la tracción nominal de 18 ksi (125 MPa) cuando no se le ha realizado ningún tratamiento térmico. Sin embargo, puede verse modificada hasta los valores de 24 ksi (165 MPa) o superiores, dependiendo del tratamiento térmico aplicado y el espesor de la pieza. El porcentaje de elongación que puede llegar a tener una probeta sin tratamiento térmico es de un 25% aproximadamente, pero se puede ver reducido a un 8 o 10% una vez realizado el tratamiento.

Por su parte, la aleación AA6063 tiene una resistencia a la tracción de 17 ksi (117 MPa) como un promedio entre los valores que puede llegar a obtenerse cuando se realiza un tratamiento térmico, pudiendo subir hasta 20 ksi (137 MPa) para determinados tratamientos. El porcentaje de elongación de esta aleación también

puede variar desde el 18%, sin tratamiento térmico, hasta un 10% con tratamiento térmico.

Para realizar un correcto análisis de la resistencia de estas aleaciones, se realiza ensayos de tracción para los materiales puros; es decir, sin tratamiento térmico ni junta soldada. Estos valores se compararon posteriormente con los resultados obtenidos en los ensayos de tracción al material puro con tratamiento térmico. Además, se realizó lo mismo para juntas soldadas, analizando su comportamiento con y sin tratamiento térmico previo a la soldadura.

5.8.1 Ensayo de tracción

Las probetas para los ensayos de tracción se fabricaron de acuerdo a lo establecido en ASME código IX (ASME, 2010), donde se estipulan las características que deben contener las probetas que van a ser ensayadas para diversos tipos de ensayos, tales como tracción y doblado de cara y raíz.

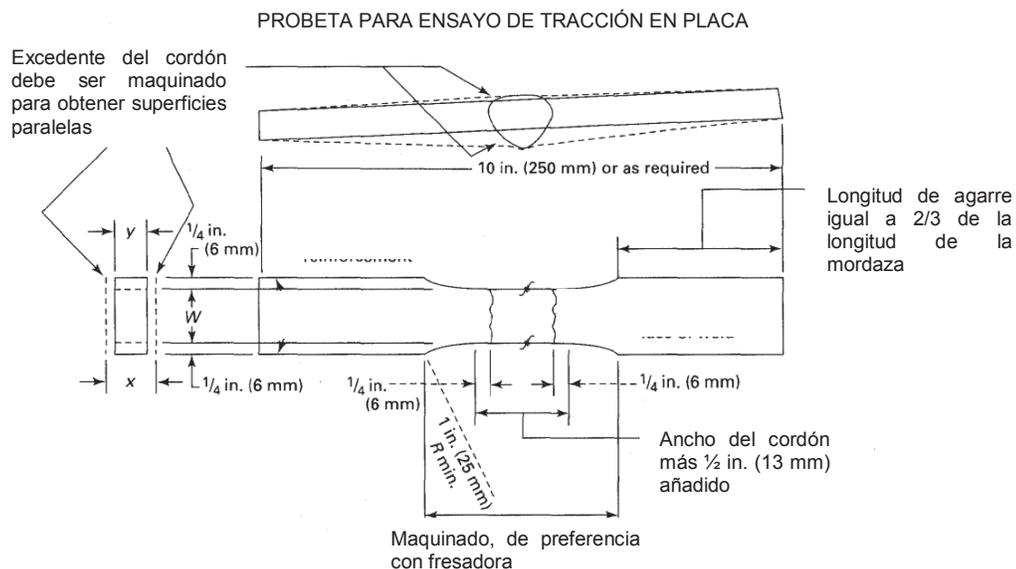


Figura 5.24 – Dimensiones de la probeta de tracción³¹

³¹ ASME. (1 de Julio de 2010). Qualification Standard for Welding and Brazing Procedures, Welders, Brazers and Welding and Brazing Operators. Nueva York, Nueva York, Estados Unidos. Pág. 157.

La cantidad de probetas utilizadas en el ensayo se determina de acuerdo a las especificaciones de ASME código IX (ASME, 2010), las cuales se encuentran detalladas en la tabla QW-451.1 en el ANEXO E.



Figura 5.25 – Modelo de una probeta de tracción con junta soldada



Figura 5.26 – Máquina universal de ensayos del Laboratorio de Análisis de Esfuerzos y Vibraciones, EPN

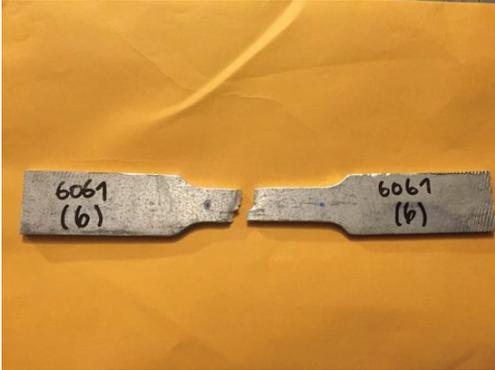
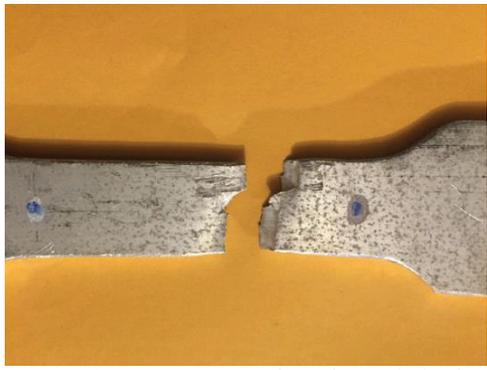


Figura 5.27 – Colocación de las probetas en la máquina universal de ensayos



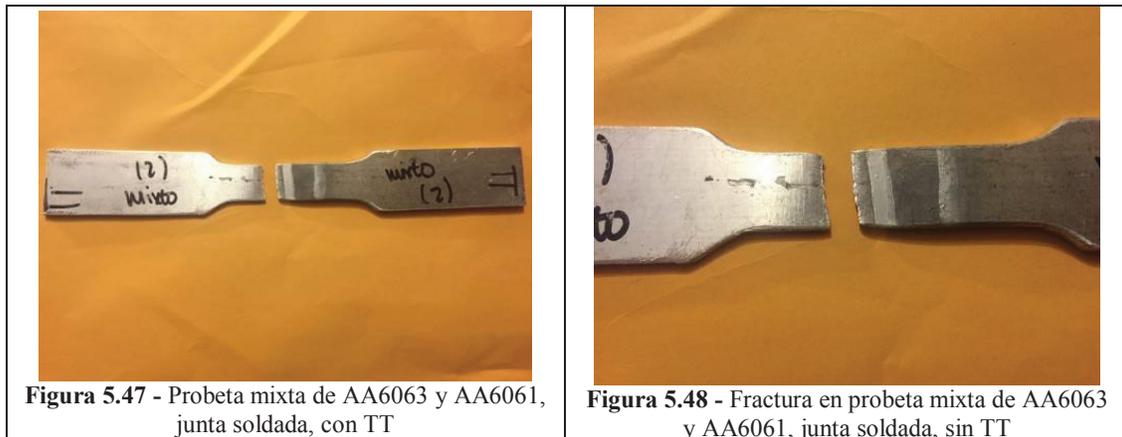
Figura 5.28 – Probeta con junta soldada al momento de presentar la falla

Tabla 5.4 - Fotografías de las probetas para los ensayos de tracción y resultados obtenidos

| Probeta | Tipo de junta | Proceso | Carga máxima registrada (lbf) | Resistencia a la tracción (ksi) | Posición de fractura |
|---|---------------|---------|--|---------------------------------|----------------------|
| 6061-F | N/A | N/A | 6156,0 | 44,15 | Entre marcas |
|  <p>Figura 5.29 - Probeta de AA6061 sin TT</p> | | |  <p>Figura 5.30 - Fractura en probeta de AA6061 sin TT</p> | | |
| 6061-TT | N/A | N/A | 6840,0 | 48,48 | Límite de marcas |
|  <p>Figura 5.31 - Probeta de AA6061 con TT</p> | | |  <p>Figura 5.32 - Fractura en probeta de AA6061 con TT</p> | | |
| 6061-TT | Tope | GMAW | 2552,0 | 22,60 | Junta soldada |
|  <p>Figura 5.33 - Probeta de AA6061, junta soldada, con TT</p> | | |  <p>Figura 5.34 - Fractura en probeta de AA6061, junta soldada, con TT</p> | | |

| | | | | | |
|---|------|------|--|-------|---------------|
| 6061-F | Tope | GMAW | 2261,0 | 17,00 | Junta soldada |
|  | | |  | | |
| <p>Figura 5.35 - Probeta de AA6061, junta soldada, sin TT</p> | | | <p>Figura 5.36 - Fractura en probeta de AA6061, junta soldada, sin TT</p> | | |
| 6063-F | N/A | N/A | 2381,0 | 27,70 | Entre marcas |
|  | | |  | | |
| <p>Figura 5.37 - Probeta de AA6063 sin TT</p> | | | <p>Figura 5.38 - Fractura en probeta de AA6063 sin TT</p> | | |
| 6063-TT | N/A | N/A | 2398,0 | 28,54 | Entre marcas |
|  | | |  | | |
| <p>Figura 5.39 - Probeta de AA6063 con TT</p> | | | <p>Figura 5.40 - Fractura en probeta de AA6063 con TT</p> | | |
| 6063-F | Tope | GMAW | 1759,0 | 21,68 | Material base |

| | | | | | |
|---|------|------|--------|--|---------------|
|  <p>Figura 5.41 - Probeta de AA6063, junta soldada, sin TT</p> | | | |  <p>Figura 5.42 - Fractura en probeta de AA6063, junta soldada, sin TT</p> | |
| 6063-TT | Tope | GMAW | 1758,0 | 21,82 | Material base |
|  <p>Figura 5.43 - Probeta de AA6063, junta soldada, con TT</p> | | | |  <p>Figura 5.44 - Fractura en probeta de AA6063, junta soldada, con TT</p> | |
| Mixto-F | Tope | GMAW | 1700,0 | 15,30 | Material base |
|  <p>Figura 5.45 - Probeta mixta de AA6063 y AA6061, junta soldada, sin TT</p> | | | |  <p>Figura 5.46 - Fractura en probeta mixta de AA6063 y AA6061, junta soldada, sin TT</p> | |
| Mixto-TT | Tope | GMAW | 1713,0 | 15,07 | Material base |



Nota: F: Material base, TT: Tratamiento térmico.

Posteriormente se realiza el ensayo a dos probetas de menor espesor en aleación 6061, con la finalidad de verificar las propiedades del material de aporte, y su comportamiento en la soldadura de placas de menor espesor, tras lo cual se tienen los siguientes resultados.

Tabla 5.5 – Fotografías y resultados de ensayo de tracción para probetas de aleación AA6061 de espesor 1.4mm

| Probeta | Tipo de junta | Proceso | Carga máxima registrada (lbf) | Resistencia a la tracción (ksi) | Posición de fractura |
|---------|---------------|---------|--|---------------------------------|----------------------|
| 6061-F | Tope | GMAW | 1177.3 | 24.66 | Material base |
| | | | <p>Figura 5.49 - Probeta de AA6061 sin TT</p> | | |
| | | | <p>Figura 5.50 - Fractura en probeta de AA6061 sin TT</p> | | |
| 6061-F | Tope | GMAW | 1080.8 | 24.38 | Material base |

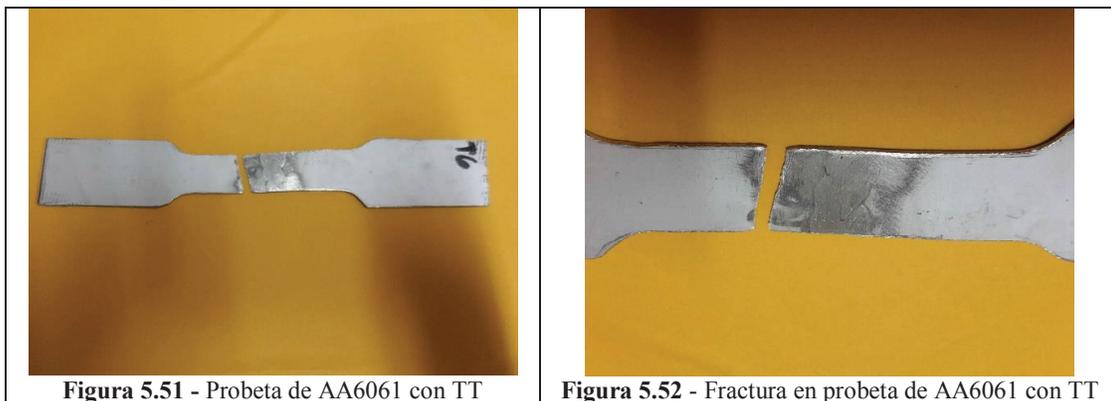


Figura 5.51 - Probeta de AA6061 con TT

Figura 5.52 - Fractura en probeta de AA6061 con TT

Nota: F: Material base, TT: Tratamiento térmico.

En las figuras 5.53 y 5.54 se muestran los resultados obtenidos con cada probeta de aleación 6061 de menor espesor.



Figura 5.53 – Resultados para probeta 1 de material AA6061 en menor espesor



Figura 5.54 – Resultados para probeta 2 de material AA6061 en menor espesor

En la tabla 5.6 se observan los resultados del ensayo de tracción a una probeta de aleación 6061, con precalentamiento y un recocido parcial posterior a la soldadura con la finalidad de observar si existen cambios notables en el comportamiento del material.

Tabla 5.6 – Resultados ensayo de tracción probeta AA6061 con precalentamiento y recocido parcial

| Probeta | Tipo de junta | Proceso | Carga máxima registrada (lbf) | Resistencia a la tracción (ksi) | Posición de fractura |
|---------|---------------|---------|-------------------------------|---------------------------------|----------------------|
| 6061-R | Tope | GMAW | 2049.76 | 20.03 | Junta soldada |

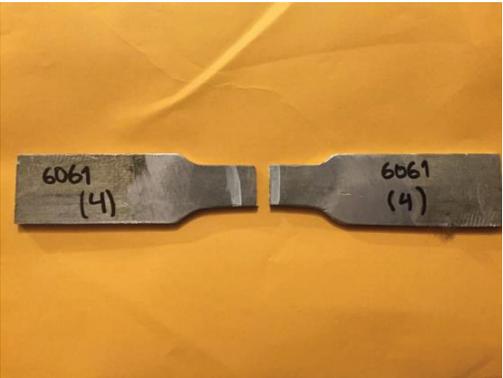


Figura 5.55 - Probeta de AA6061 con recocido



Figura 5.56 - Fractura en probeta de AA6061 con recocido

Nota: R: recocido

En la figura 5.57 se puede observar el valor máximo de fuerza que soporta la probeta analizada.



Figura 5.57 – Carga máxima en probeta AA6061 con recocido

5.8.2 Ensayo de dureza

El análisis de dureza del material 6061 y 6063 se puede llevar a cabo en Laboratorio de Conformado Mecánico de la Facultad de Ingeniería Mecánica de la Escuela Politécnica Nacional, en donde se utiliza el durómetro Rockwell marca Hardrocker, modelo HR150A con la finalidad de determinar la dureza del material tanto en material base, como post tratamiento y además analizar el efecto de la zona afectada por el calor en la dureza del material.



Figura 5.58 – Durómetro Rockwell, marca Hardrocker, modelo HR150A

Para el caso de las aleaciones de aluminio usadas, según recomendación de la norma ASTM E18, se usó las escalas Rockwell E y H, tal como se describe en el ANEXO F, tomado de dicha norma.

Para este análisis, en el caso de la escala E, se usa un indentador de bola de 1/8, y aplicando una fuerza de 100 kgf. En cuanto a la escala H, se usa el mismo indentador; sin embargo, la fuerza aplicada disminuyó a 60 kgf.



Figura 5.59 – Realización del ensayo de dureza a una probeta de aluminio AA6061

Para la caracterización de cada tipo de material se realiza cinco mediciones en diferentes puntos de la probeta, para evitar que alguna medición previa altere el futuro resultado. En la tabla 5.7 se detallan las mediciones y promedio para cada una de las muestras analizadas. Las probetas a usarse para este ensayo deben cerciorarse de tener superficies planas paralelas con la finalidad de obtener valores con el menor error posible, puesto que una superficie irregular o distorsión puede alterar la medición de este ensayo. (ASTM, 2004)

Tabla 5.7 – Resultados de durezas para aleaciones AA6061 y AA6063, con y sin tratamiento térmico

| Muestra | Número de muestras | | | | | Promedio [HRE] |
|----------------|--------------------|---------|---------|---------|---------|-------------------|
| | 1 [HRE] | 2 [HRE] | 3 [HRE] | 4 [HRE] | 5 [HRE] | |
| 6061-F | 86 | 90 | 90 | 91 | 88 | 89 |
| 6061-TT | 97 | 95 | 96 | 97 | 96 | 96 |
| 6063-F | 73 | 75 | 76 | 75 | 67 | 73 |
| 6063-TT | 78 | 78 | 79 | 77 | 78 | 78 |

Nota: F: Probeta de material base, TT: Probeta sometida a tratamiento térmico

Posteriormente se realiza mediciones sobre la dureza del material en las juntas soldadas, con la finalidad de evidenciar el impacto de la zona afectada por el calor en la dureza del material base. Las tablas 5.8 y 5.9 muestran los diferentes valores de dureza obtenidos para cada material.

Tabla 5.8 – Valores de dureza en función de la distancia para junta soldada de aleación AA6063

| Número de Medición | Junta soldada AA6063 | |
|--------------------|----------------------|-------------------------------------|
| | Valor de dureza | Distancia al centro del cordón [mm] |
| 1 | 29 [HRH] | 9.6 |
| 2 | 16 [HRE] | 19.6 |
| 3 | 60 [HRE] | 33 |
| 4 | 71 [HRE] | 41 |

Tabla 5.9 – Valores de dureza en función de la distancia para junta soldada de aleación AA6061

| Número de Medición | Junta soldada AA6061 | |
|--------------------|----------------------|-------------------------------------|
| | Valor de dureza | Distancia al centro del cordón [mm] |
| 1 | 47 [HRE] | 7 |
| 2 | 65 [HRE] | 11 |
| 3 | 74 [HRE] | 23 |
| 4 | 76 [HRE] | 34.5 |
| 5 | 91 [HRE] | 42 |

En la tabla 5.10 se muestran los resultados de dureza para una junta soldada de aleación 6061, la cual fue sometida a un precalentamiento y a un recocido parcial post soldadura.

Tabla 5.10 – Valores de dureza en junta soldada de aleación AA6061 con tratamiento térmico de recocido post soldadura

| Número de Medición | Junta soldada AA6061 (con normalizado) | |
|--------------------|--|-------------------------------------|
| | Valor de dureza | Distancia al centro del cordón [mm] |
| 1 | 90 [HRL] | 32 |
| 2 | 90 [HRL] | 50 |
| 3 | 90 [HRL] | 69 |
| 4 | 92 [HRL] | 87 |
| 5 | 98 [HRL] | 104 |

5.9 ANÁLISIS DE LA SOLDABILIDAD DE LOS ALUMINIOS AA6063 Y AA6061

En el desarrollo de este estudio, se ha destacado que las características más importantes de las aleaciones de la serie 6XXX son la soldabilidad y maquinabilidad.

Para determinar la soldabilidad del material existen diversos tipos de ensayos, los cuales deben ser calificados de acuerdo a normas. Los principales objetivos de este ensayo son verificar la penetración de la soldadura, presencia de poros y otros defectos superficiales.

5.9.1 Ensayo de soldabilidad houldcroft

Se selecciona este ensayo debido a que es el más adecuado para el análisis de la soldabilidad en juntas soldadas de aluminio bajo el proceso GMAW, además de ser uno de los ensayos más utilizados para la evaluación de la soldabilidad. (Kolarik, Kovanda, Valova, Vondrous, & Dunovsky, 2011), (Messler, Jr., 2004)

El ensayo Houldcroft es un ensayo de soldabilidad que determina la aparición de grietas en caliente durante la fabricación del cordón. Este ensayo requiere la

preparación previa de las probetas, de acuerdo a lo especificado en el ítem 5.7 detallado anteriormente.



Figura 5.60 – Procedimiento de soldadura para el ensayo Houldcroft

Las probetas se realizan con ranuras a los lados con el objetivo de verificar si se forman grietas desde el cordón con dirección hacia estos concentradores de esfuerzos, y de ese modo medir el porcentaje de presencia de grietas de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$A = \frac{L_g}{L_t} \times 100\%$$

Donde L_g es la longitud de la grieta, L_t la longitud total del cordón de soldadura, y A queda representado por el porcentaje de agrietamiento que presenta la probeta. En cualquier material, el objetivo principal es obtener un porcentaje mínimo de agrietamiento, ya que de este modo se garantiza una mejor calidad del cordón. Para los aluminios de la serie 6XXX, el autor Krüger recomienda un porcentaje máximo de 35%. (Krüger, 1994)

La calidad del cordón se define mediante ensayos no destructivos. Para este caso en particular, se ha elegido el ensayo de tintas penetrantes, ya que permite realizar la calificación de las características superficiales del cordón de soldadura. Los ensayos se realizan en el Laboratorio de Ensayos no Destructivos de la Escuela Politécnica Nacional.

Las tintas penetrantes son un proceso generalmente utilizado para aleaciones no ferrosas, cuando la inspección por partículas magnéticas no es posible. Este ensayo se rige bajo el principio de capilaridad, donde el líquido aplicado se absorbe en las grietas existentes en la superficie y luego se puede ver por medio de la aplicación de un revelador. En el mercado se pueden clasificar en dos grandes grupos: por el color y por la solubilidad. Dentro del primer grupo se divide en tintas coloreadas y tintas fluorescentes, siendo las primeras las de más fácil utilización porque no requieren de ningún equipo especial y se pueden apreciar con luz blanca; y las fluorescentes por su parte, requieren de luz negra para poder ver los resultados. Por la solubilidad, las tintas se dividen en solubles en agua o autoemulsificables, postemulsificables o no solubles en agua, y eliminables con disolvente. (ASTM, 2016)

Además, es necesario conocer el tipo de método que se debe utilizar, ya que cada tipo de tinta seleccionada exige ciertos productos que deben ser utilizados para la remoción de la misma. Las características del método, el proceso que se debe seguir, y los tiempos recomendados de acuerdo al material analizado y la tinta, se especifican en la norma ASTM E-165 (ASTM, 2016)

Tabla 5.11 – Clasificación de los líquidos penetrantes y sus métodos de aplicación³²

| TIPOS Y MÉTODOS DE APLICACIÓN DE LÍQUIDOS PENETRANTES |
|--|
| TIPO I – LÍQUIDOS PENETRANTES FLUORESCENTES |
| Método A – Lavable en agua |
| Método B – Post-emulsificable, lipofílico |
| Método C – Removible con solvente |
| Método D – Post-emulsificable, hidrofílico |
| TIPO II – LÍQUIDOS PENETRANTES COLOREADOS |
| Método A – Lavable en agua |
| Método B – Removible con solvente |

Modificado de ASTM E-165

³² ASTM. (2016, Julio 21). Standard Practice for Liquid Penetrant Examination for General Industry. Estados Unidos. Pág. 465.

De acuerdo a la norma ASTM E-165, el aluminio y sus aleaciones deben ser tratadas por medio del método C, con un tiempo de actuación del líquido penetrante de 10 minutos. Esto puede comprobarse en el ANEXO G. (ASTM, 2016)

El primer paso para la realización de este ensayo es la preparación de las probetas. Esto implica la limpieza cuidadosa del cordón y la superficie, la cual puede ser realizada con disolvente industrial de pintura (tiñero) utilizando un paño que no deje pelusas.

Una recomendación importante que debe tomarse en cuenta, es que durante el tiempo de actuación del penetrante se debe procurar que la tinta no se seque del todo, repitiendo la aplicación para mantener humectado el cordón y obtener mejores resultados. Esto debe realizarse cuando ha transcurrido la mitad del tiempo determinado.



Figura 5.61 – Preparación de las probetas

Una vez realizada la limpieza, se procede con la aplicación de la tinta. Para realizar esto, se debe haber seleccionado previamente el tipo de tinta que se va a utilizar, dependiendo del material de las probetas. También es importante determinar el tiempo de reposo del penetrante en las probetas. Para el caso

particular del aluminio, se requiere un tiempo de entre 8 y 10 minutos de reposo para que actúe de forma adecuada.

Posteriormente, debe realizarse una limpieza del exceso de penetrante. De acuerdo a las especificaciones de ASTM SE-165, esto debe efectuarse con un paño que no deje pelusa y ligeramente humedecido en disolvente. Esto permitirá que el penetrante se quite y solamente se mantenga el que se ha acumulado en las discontinuidades. Además, debe realizarse la limpieza en un solo sentido y sin presionar demasiado, ya que de lo contrario se eliminará el penetrante acumulado en las discontinuidades superficiales.

El revelador, en forma de finas partículas de polvo que se aplican por rociado, absorbe el penetrante atrapado en las discontinuidades, mostrando así los puntos donde se encuentran las mismas y permitiendo la calificación del cordón. En la figura 5.62 se puede observar una imagen de la tinta y revelador usado. (AWS, 2003)



Figura 5.62 – Penetrante y revelador utilizados en el proceso



Figura 5.63 – Probetas con tinta penetrante durante el tiempo de reposo

Antes de la aplicación del revelador, debe limpiarse el exceso de tinta de las probetas. Esto debe realizarse con un paño sin pelusa, para asegurar que no se confundan los residuos con una posible discontinuidad.



Figura 5.64 – Aplicación del revelador

La función del revelador en este ensayo, es permitir que se hagan visibles las grietas y otras discontinuidades presentes en el cordón de soldadura.

Tabla 5.12 – Resultado ensayo de tintas en probetas Houldcroft

| Probeta | Presencia de fisuras | Otras discontinuidades | Descripción |
|---|----------------------|------------------------|--|
| 6061-F | NO | SÍ | Porosidades Salpicaduras |
|  <p data-bbox="516 930 1140 957">Figura 5.65 - Ensayo de tintas penetrantes en AA6061 sin TT</p> | | | |
| 6061-TT | NO | SÍ | Porosidades Salpicaduras Mordeduras |
|  <p data-bbox="516 1535 1140 1562">Figura 5.66 - Ensayo de tintas penetrantes en AA6061 con TT</p> | | | |
| 6063-F | NO | SÍ | Porosidades Salpicaduras Sobremonta excesiva |



Figura 5.67 - Ensayo de tintas penetrantes en AA6061 sin TT

| | | | |
|---------|----|----|--|
| 6063-TT | SÍ | SÍ | Porosidades Salpicaduras Sobremonta excesiva |
|---------|----|----|--|



Figura 5.68 - Ensayo de tintas penetrantes en AA6063 con TT

| | | | |
|---------|----|----|--|
| Mixto-F | NO | SÍ | Porosidades Salpicaduras Sobremonta excesiva |
|---------|----|----|--|



Figura 5.69 - Ensayo de tintas penetrantes en AA6063 y AA6061 sin TT

| | | | |
|----------|----|----|-----------------------------|
| Mixto-TT | NO | SÍ | Porosidades Salpicaduras |
|----------|----|----|-----------------------------|



Figura 5.70 - Ensayo de tintas penetrantes en AA6063 y AA6061 con TT

Nota: F: Material base, TT: Tratamiento térmico.

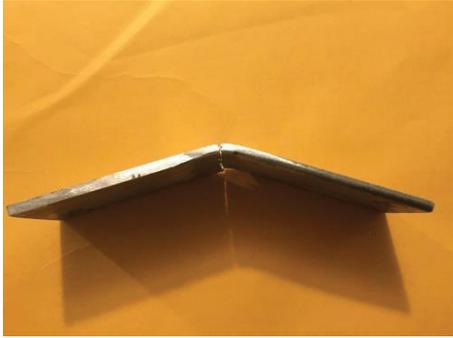
5.9.2 Ensayo de doblado de cara y raíz de junta soldada

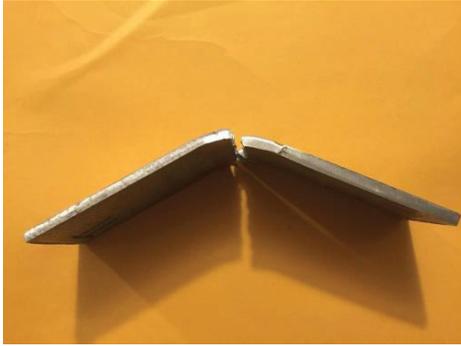
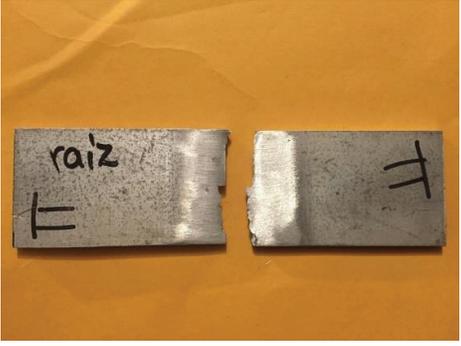
Con la finalidad de comprobar la buena soldabilidad de las aleaciones 6061 y 6063, se establece el uso de los ensayos de doblado de cara y de raíz para las juntas soldadas de ambas aleaciones, con y sin tratamiento térmico.

Para este ensayo, los parámetros se basaron en el código ASME IX, el cual establece geometrías definidas para las probetas ensayadas, tal como se describe en numerales anteriores. Esta norma, aparte de definir las geometrías de probetas y guías para el doblado, establece el número de probetas o especímenes necesarios con la finalidad de avalar el ensayo. En el ANEXO E se detallan las especificaciones para determinar el número de probetas requeridas. (ASME, 2010)

En la tabla 5.12 se detallan los resultados de doblado de cara y de raíz para cada aleación, en donde se presenta un muestreo de una probeta de cada tipo de material, puesto a que los resultados son idénticos para cada tipo de probeta.

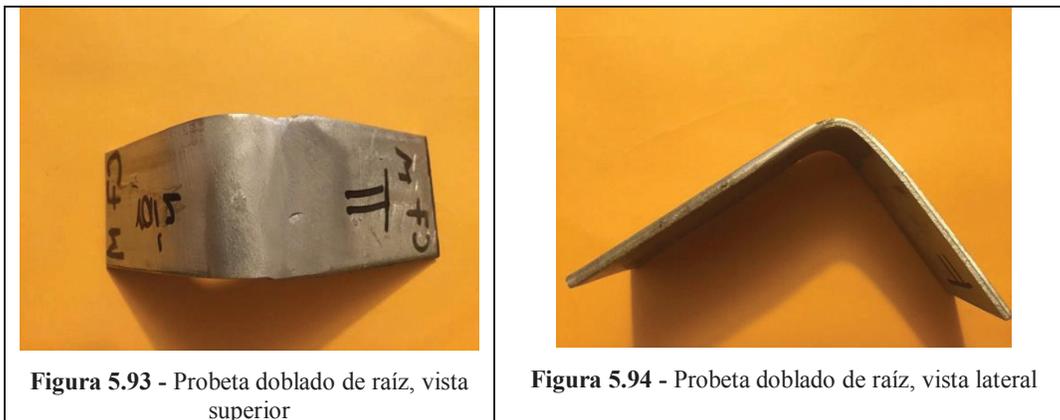
Tabla 5.13 – Resultados de ensayos de doblado guiado de cara y raíz para aleación AA6061 y AA6063

| Probeta | Tipo de doblado | Aprobación según código ASME IX | Comentarios |
|---|-----------------|--|---|
| 6061-F | Cara | No | Ruptura de la probeta en la zona del cordón, ruptura de tipo frágil, material de aporte fragilizado |
|  | |  | |
| 6061-F | Raíz | No | Ruptura de la probeta en la zona del cordón, ruptura de tipo frágil, material de aporte fragilizado |
|  | |  | |
| 6061-TT | Cara | No | Ruptura de la probeta en la zona del cordón, ruptura de tipo frágil, material de aporte |

| | | | |
|---|------|--|---|
| | | | fragilizado |
|  | |  | |
| <p>Figura 5.75 - Probeta doblado de cara, vista superior</p> | | <p>Figura 5.76 - Probeta doblado de cara, vista lateral</p> | |
| 6061-TT | Raíz | No | Ruptura de la probeta en la zona del cordón, ruptura de tipo frágil, material de aporte fragilizado |
|  | |  | |
| <p>Figura 5.77 - Probeta doblado de raíz, vista superior</p> | | <p>Figura 5.78 - Probeta doblado de raíz, vista lateral</p> | |
| 6063-F | Cara | Si | No se observa ninguna discontinuidad |
|  | |  | |
| <p>Figura 5.79 - Probeta doblado de cara, vista superior</p> | | <p>Figura 5.80 - Probeta doblado de cara, vista lateral</p> | |
| 6063-F | Raíz | Si | Se observa una fisura de 2 mm |

| | | | |
|---|------|--|---------------------------------------|
| | | | al borde de la probeta |
|  | |  | |
| Figura 5.81 - Probeta doblado de raíz, vista superior | | Figura 5.82 - Probeta doblado de raíz, vista lateral | |
| 6063-TT | Cara | Si | No se observa ninguna discontinuidad |
|  | |  | |
| Figura 5.83 - Probeta doblado de cara, vista superior | | Figura 5.84 - Probeta doblado de cara, vista lateral | |
| 6063-TT | Raíz | Si | No se observa ninguna discontinuidad. |
|  | |  | |
| Figura 5.85 - Probeta doblado de raíz, vista superior | | Figura 5.86 - Probeta doblado de raíz, vista lateral | |
| Mixto-F | Cara | Si | No se observa ninguna discontinuidad |

| | | | |
|---|------|---|--------------------------------------|
|  <p>Figura 5.87 - Probeta doblado de cara, vista superior</p> | |  <p>Figura 5.88 - Probeta doblado de cara, vista lateral</p> | |
| Mixto-F | Raíz | SI | No se observa ninguna discontinuidad |
|  <p>Figura 5.89 - Probeta doblado de raíz, vista superior</p> | |  <p>Figura 5.90 - Probeta doblado de raíz, vista lateral</p> | |
| Mixto-TT | Cara | SI | No se observa ninguna discontinuidad |
|  <p>Figura 5.91 - Probeta doblado de cara, vista superior</p> | |  <p>Figura 5.92 - Probeta doblado de cara, vista lateral</p> | |
| Mixto-TT | Raíz | Si | No se observa ninguna discontinuidad |



Nota: F: Material base, TT: Tratamiento térmico.

Con la finalidad de complementar el estudio, se realiza el mismo ensayo de doblado para probetas de mucho menor espesor, (1.4mm), para comparar y analizar los resultados obtenidos. En la tabla 5.14 se muestran los resultados para probetas de material 6061 de menor espesor, las cuales aprueban los ensayos de doblado de cara y de raíz.

Tabla 5.14 – Resultados ensayos de doblado de cara y raíz para aleación AA6061 de menor espesor

| Probeta | Tipo de doblado | Aprobación según código ASME IX | Comentarios |
|---|--|---------------------------------|--------------------------------------|
| 6061-F | Cara | Si | No se observa ninguna discontinuidad |
| | | | |
| <p>Figura 5.95 - Probeta doblado de cara, vista superior</p> | <p>Figura 5.96 - Probeta doblado de cara, vista lateral</p> | | |

| | | | |
|---|------|---|--------------------------------------|
| 6061-F | Raíz | SI | No se observa ninguna discontinuidad |
|  <p>Figura 5.97 - Probeta doblado de raíz, vista superior</p> | |  <p>Figura 5.98 - Probeta doblado de raíz, vista lateral</p> | |

Nota: F: Material base, TT: Tratamiento térmico.

En la figura 5.99 se observa el equipo de doblado usado, perteneciente al Laboratorio de Soldadura de la Facultad de Ingeniería Mecánica de la EPN. El equipo consiste de una prensa hidráulica de cabezal inferior móvil, el cual permite el doblado de la probeta.



Figura 5.99 – Equipo de ensayo para doblado guiado

5.10 INSPECCIÓN METALOGRÁFICA

Para analizar la estructura del material, se implementa un estudio metalográfico de las aleaciones AA6061 y AA6063, en donde se analizan los cambios en la estructura del material debido al proceso de soldadura en ambas aleaciones, y a su vez las juntas soldadas que poseen un tratamiento térmico. Buscando ilustrar la forma de estructura y los tipos de falla del material, se decide realizar macrografías y micrografías, en donde las macrografías son utilizadas para observar la forma de la falla del material, principalmente en las probetas ensayadas a tracción, y en las micrografías observar las diferentes estructuras, que determinan el comportamiento del material, debido a la presencia de precipitados, cambios en la estructura debido a la zona afectada por el calor, análisis del material de aporte y su unión con el metal base.

Con los resultados obtenidos, de la forma de la microestructura se plantea hacer un análisis comparativo de la estructura encontrada, relacionando lo encontrado con los gráficos provistos en el ASM Metals Handbook volumen 9.

Para la preparación de los especímenes para el estudio metalográfico se siguieron los siguientes pasos conforme a la norma ASTM E3.

El proceso de preparación de probetas inicia con la obtención de muestras representativas de cada aleación, tanto para material con y sin tratamiento, para lo cual se recurre a separar dichas muestras cortando mediante una sierra, posteriormente se realiza el montaje de dichas muestras en Bakelita, que es un compuesto a base de resina poliéster, el cual permite la fácil manipulación de muestras muy pequeñas, como en este caso.

Las muestras montadas en la bakelita, deben estar perpendiculares a la superficie que va a ser preparada para el análisis, para así facilitar la observación del espécimen. Luego de que la resina poliéster se endurece, se procede al desprendimiento del molde, para lo cual se procura evitar romper o quebrar la muestra preparada al momento de desmontar.

Después del desmontaje se procede al desbaste de la zona que va a ser analizada, para lo cual se procede al desbaste fino mediante el uso de lijas 240, 320, 480, 600, 1000, 1500, 2000, valores que representan la cantidad de granos por pulgada cuadrada, en donde mientras más elevado es el número de la lija, más fino el desbaste que se realizará con ella.



Figura 5.100 – Equipo de desbaste fino

El desbaste en las lijas se debe hacer sobre un equipo de desbaste fino que proporcione un flujo de agua sobre las lijas para así eliminar el material desprendido del desbaste de las muestras. En la figura 5.100 se puede observar el equipo usado.

El procedimiento de desbaste fino consiste en realizar el lijado en un solo sentido sin cambiar la orientación de la probeta, hasta que se observen que todas las líneas producto del lijado, tengan una misma orientación, para posteriormente pasar a una lija más fina cambiando la orientación de la muestra en 90 grados, y repitiendo este proceso hasta culminar con el desbaste en la lija 2000.

Posteriormente se requiere realizar un pulido de la superficie de la muestra, para lo cual se usa alúmina de 0.3 micras, como se observa en la figura 5.101.



Figura 5.101 – Recipiente de solución de alúmina de 0.3 micras

La alúmina, que se encuentra en una solución acuosa, es rociada sobre el paño del equipo de pulido, el cual consta de un disco giratorio accionado por un motor eléctrico, que también posee una fuente de agua. El equipo usado se lo observa en la figura 5.102.



Figura 5.102 – Equipo de pulido

El pulido de la muestra se lo realiza colocando la superficie trabajada directamente sobre el paño, en donde se deben realizar movimientos circulares suaves sin aplicar mucha presión sobre la muestra, evitando así excesiva fricción entre el paño y la superficie trabajada, esto debido a que si se ejerce demasiada presión, se pueden originar rayaduras en la muestra, lo que conllevaría a retornar nuevamente el desbaste fino en la probeta.

Una vez que la superficie trabajada tenga la apariencia de un espejo y no se visualicen rayaduras o manchas en la superficie del metal, se procede a limpiar la superficie con alcohol etílico al 99.8%, y luego de ello se realiza un secado de la superficie. En la figura 5.103 se observa el alcohol usado en el proceso.

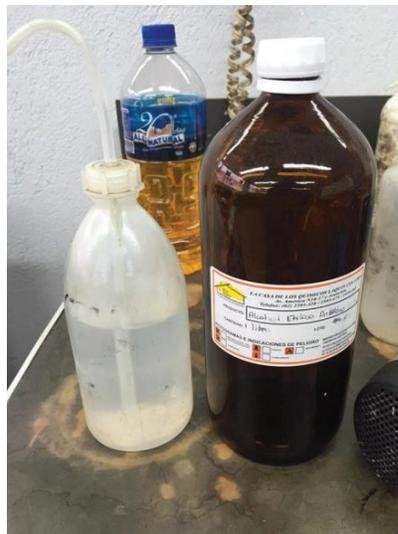


Figura 5.103 – Alcohol etílico al 99.8%

Finalmente, la probeta es llevada al microscopio metalográfico para el análisis de la estructura del material, para lo cual se usa aumentos de 100X y 500X.

El microscopio metalográfico se caracteriza por permitir una observación precisa de la microestructura del material, y así encontrar las distintas zonas que pueden componer el mismo, como por ejemplo la interfaz del cordón de soldadura con el metal base, o la zona afectada por el calor. En el Laboratorio de Metalografía de la Escuela Politécnica Nacional se puede acceder a un microscopio para la toma

de macrográficas, de la marca Olympus, el mismo que cuenta con iluminación apropiada para que estas tomas sean adecuadas, ya que no se realizan con aumento; además, se cuenta con otro microscopio, también de marca Olympus, para la toma de micrográficas, en el cual se puede realizar los aumentos necesarios para poder apreciar de la mejor manera las estructuras internas del material analizado. En la figura 5.104 se observa el microscopio Olympus.



Figura 5.104 – Microscopio Olympus

5.11 ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS PARA CALIFICACIÓN DE SOLDADURA

La aplicación de ensayos no destructivos es uno de los procedimientos mayormente llevados a cabo en la industria, ya que son muy ventajosos y relativamente fáciles de llevar a cabo. Los más utilizados son la inspección visual, tintas penetrantes, partículas magnéticas, ultrasonido y radiografía. No obstante, los dos últimos son los más costosos, y son utilizados principalmente para tuberías de transporte de hidrocarburos a gran escala.

Entre las ventajas que se encuentran a la utilización de este tipo de ensayos están el precio, ya que son relativamente económicos; tiempo que se utiliza en la aplicación de los mismos; no requiere demasiada calificación por parte del personal que los realiza, fácil transporte a lugares difíciles para la examinación, entre otros.

Para la inspección y calificación de los cordones de soldadura en la presente investigación, se eligió la inspección visual y los líquidos penetrantes.

5.11.1 Inspección visual

Con la finalidad de evaluar la soldadura de aluminio bajo el proceso GMAW, se usa la inspección visual como primer ensayo no destructivo. Mediante este proceso se busca aceptar o rechazar las uniones soldadas dependiendo del tipo de discontinuidades o características que posea el cordón de soldadura, según los criterios de la norma AWS D1.2, específicamente en la sección de inspección visual.

Los criterios de aceptación de acuerdo a la norma mencionada son los siguientes:

- (1) Las superficies de las caras y raíces no deben mostrar grietas.
- (2) Los cráteres que aparezcan en el cordón deben ser rellenados, hasta colmar toda la sección transversal del cordón.

- (3) Los bordes del cordón deben juntarse suavemente con el metal base.
- (4) La falta de material de aporte no será superior a 0,01 pulg. [0,25 mm].
- (5) En la raíz debe observarse fusión completa con el metal base.
- (6) La penetración máxima de las soldaduras a tope en tubo o tubería no debe superar 1/8 pulg. [3 mm].
- (7) La concavidad de la raíz no debe superar los 1/16. [2 mm].
- (8) Espesor total de soldadura debe ser igual o mayor que el espesor del metal de base.

Para mejorar la observación de desperfectos en la soldadura se usa una lupa magnificadora con la finalidad de hacer más visibles las pequeñas discontinuidades en la junta soldada.

Los resultados de la inspección visual en las diferentes juntas se detallan en la tabla a continuación:

Tabla 5.15 – Resultados de inspección visual para todos los tipos de juntas usadas

| Tipo de junta | Criterio 1 | Criterio 2 | Criterio 3 | Criterio 4 | Criterio 5 | Criterio 6 | Criterio 7 | Criterio 8 | Aprueba |
|---------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|---------|
| 6061-F | X | X | X | X | X | X | X | X | SI |
| 6061-TT | X | X | X | X | - | X | X | X | SI |
| 6063-F | X | X | X | X | X | X | X | X | SI |
| 6063-TT | X | X | X | X | X | X | X | X | SI |
| Mixto-F | X | X | X | X | X | X | X | X | SI |
| Mixto-TT | X | X | X | X | - | X | X | X | SI |

Nota: X: Aprueba, -: no aprueba

En el caso de las juntas 6061-TT y Mixta-TT, estas no cumplen en su totalidad el criterio 5; sin embargo, las zonas donde las juntas no poseían buena fusión en la raíz con el metal base, dicha porción de material fue descartada y no fue usada

en ningún análisis futuro, es por ello que se considera que todos los tipos de juntas aprueban la inspección visual según los criterios de la norma AWS D1.2.

5.11.2 Inspección por tintas penetrantes

Como se explica en el apartado 5.9.1, para realizar una inspección por tintas penetrantes es necesario determinar el tipo de tinta a ser utilizada y el tiempo de permanencia de tinta y removedor para obtener los mejores resultados.

La tabla 5.16 muestra las medidas de las discontinuidades encontradas en los cordones de soldadura calificados.

Tabla 5.16 – Calificación de los cordones de soldadura

| Material | Discontinuidad | Aprueba | Observaciones |
|----------|--|---------|---|
| 6061-F | Poros $\varnothing = 0.2$ mm | X | ASTM E-165 y AWS D1.2 ³³ determinan que para que un cordón apruebe o no, se requiere que el mismo no contenga grietas ni sobremonta excesiva, además de tener buena penetración y fusión del material base con el material de aporte. Los poros y las salpicaduras se encuentran dentro de lo aceptado por estas normas. |
| 6063-F | Poros $\varnothing = 0.8$ mm | X | |
| 6063-TT | Poros $\varnothing = 0.15$ mm | X | |
| | $\varnothing = 0.1$ mm $\varnothing = 0.1$ mm $\varnothing = 0.1$ mm Salpicaduras | | |
| Mixto-TT | Poros $\varnothing = 0.15$ mm Salpicaduras | X | |

[X: aprueba; N: no aprueba]

³³ AWS. (2003, Febrero 6). Structural Welding Code-Aluminium. Norma AWS D1.2/D1.2M:2003(4ta Edición). Miami, Florida, Estados Unidos.



Figura 5.105 – Discontinuidades en cordón de AA6061-F

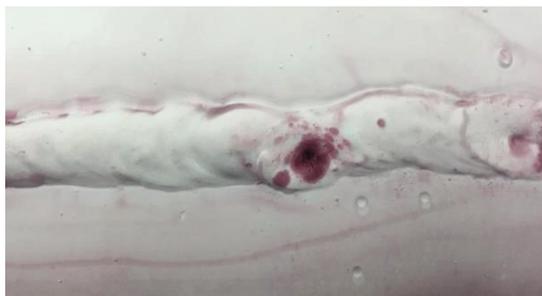


Figura 5.106 – Discontinuidades en cordón de AA6063-F



Figura 5.107 – Discontinuidades en cordón de AA6063-TT

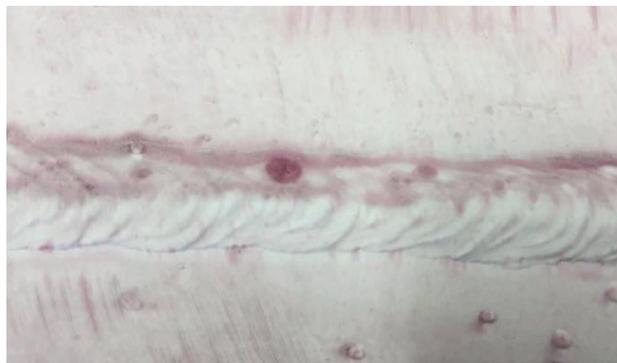


Figura 5.108 – Discontinuidades en cordón mixto-TT

CAPÍTULO 6

RESULTADOS Y DISCUSIONES

6.1 ANÁLISIS DE LA RESISTENCIA MECÁNICA Y SOLDABILIDAD DEL ALUMINIO AA6063

Para comprender de mejor manera los cambios encontrados en el comportamiento de la aleación AA6063 antes y después de aplicar el tratamiento térmico, tanto en material base como en junta soldada, a continuación se presenta un análisis comparativo de los resultados obtenidos en los ensayos realizados.

6.1.1 Comparación de la resistencia mecánica del aluminio AA6063 antes y después de la aplicación del tratamiento térmico por envejecimiento

Con la finalidad de analizar la resistencia mecánica de la aleación AA6063, se realizan ensayos de tracción y dureza, antes y después de aplicar el tratamiento térmico de envejecimiento artificial, tanto a las juntas soldadas como al material base.

Tabla 6.1 – Resultados del ensayo de tracción para AA6063-F y AA6063-TT

| | RESISTENCIA MECÁNICA MATERIAL BASE | |
|------------------------|---|----------------|
| | Condición del material | |
| | 6063-F | 6063-TT |
| Probeta 1 [ksi] | 27.7 | 27.81 |
| Probeta 2 [ksi] | 26.73 | 28.54 |
| Promedio [ksi] | 27.22 | 28.18 |

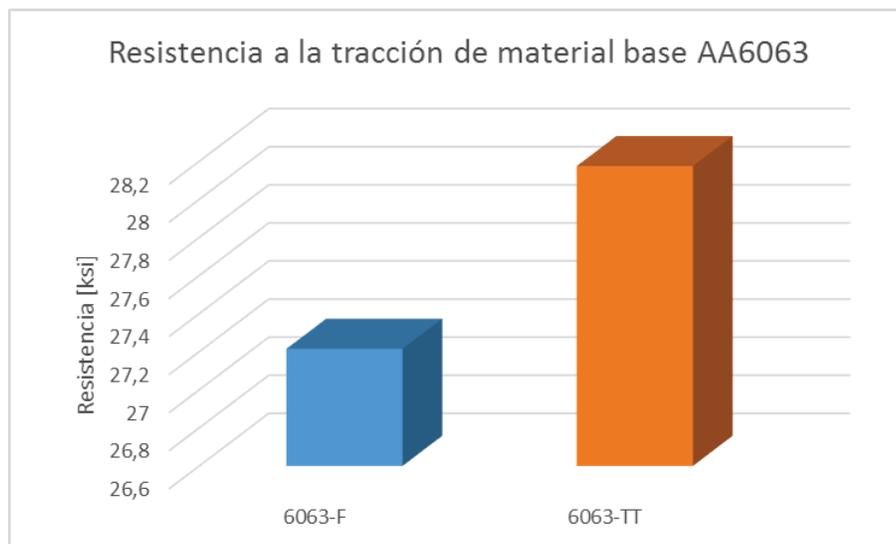


Figura 6.1 – Comparación de resultados de ensayo de tracción en AA6063-F y AA6063-TT

Los ensayos de tracción para el material base, muestran que el material incrementa su resistencia en aproximadamente un 5 % al aplicar el tratamiento térmico, lo cual indica que este procedimiento es válido para obtener mejores propiedades en este aspecto. En este ensayo se pudo observar un aumento en el límite de fluencia del material al aplicar el tratamiento térmico, además de una consecuente elevación del porcentaje de elongación del material. Esto último puede estar estrechamente relacionado con el alivio de esfuerzos correspondiente al tratamiento térmico, ya que se obtuvo un mínimo aumento en la ductilidad del material. Cabe aclarar que el material es obtenido por medio de un proceso de extrusión, lo cual lo hace proclive a desarrollar esfuerzos internos, los mismos que mostraron cambios al realizar el envejecimiento artificial.

Tabla 6.2 – Resultados del ensayo de tracción para AA6063-F y AA6063-TT en junta soldada

| RESISTENCIA MECÁNICA JUNTA SOLDADA | | |
|---|---------------|----------------|
| Condición del material | | |
| | 6063-F | 6063-TT |
| Probeta 1 [ksi] | 19.67 | 21.82 |
| Probeta 2 [ksi] | 21.68 | 21.83 |
| Promedio [ksi] | 20.68 | 21.83 |

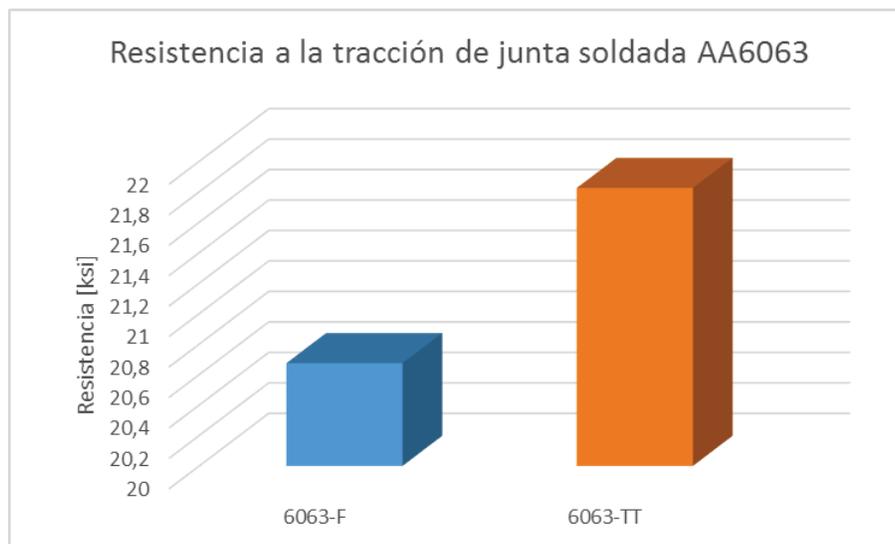


Figura 6.2 – Comparación de resultados de ensayo de tracción en AA6063-F y AA6063-TT con junta soldada

Con respecto a los ensayos de tracción realizados en las juntas soldadas, el material muestra un comportamiento similar al del material base sin junta, incrementado su resistencia mecánica en más de 5 %. El material presenta aumentos en el límite de fluencia, y es muy receptivo a la soldadura antes de aplicar el tratamiento térmico. Una vez aplicado el mismo se presentan mayores dificultades para soldar, sin ser esto un impedimento para lograr un cordón adecuado. Esta aleación es bastante dúctil y además los ensayos de tracción de junta soldada presentan fractura en el material base. Sin embargo, el valor de la resistencia mecánica en material con y sin tratamiento térmico, presenta una disminución considerable. Esto puede deberse a los cambios en la microestructura provocados por la soldadura, principalmente en la zona afectada por el calor.

Por ser el aluminio un material relativamente dúctil con respecto a los aceros, las escalas en las cuales se puede medir la dureza deben ser consecuentes con las propiedades del material. Esto quiere decir que se debe seleccionar una escala del rango Rockwell que sea capaz de medir la dureza de un material tan suave como este, o a su vez seleccionar otra escala de medición para obtener resultados más precisos. Como se explica en el capítulo 5, la medición de dureza

de las aleaciones en cuestión se realiza utilizando la escala Rockwell, en sus variantes E, H y L.

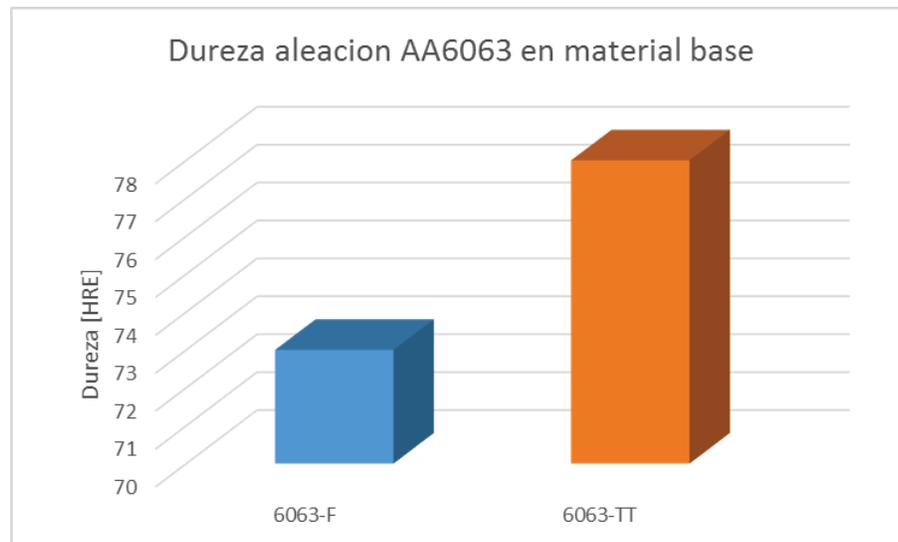


Figura 6.3 – Comparación de resultados de ensayo de dureza en AA6063-F y AA6063-TT

La aleación AA6063 se caracteriza por ser muy maleable, de ahí que sea utilizada mayormente en el campo arquitectónico, para la fabricación de perfiles por medio del proceso de extrusión. Las mediciones demostraron que el material tiene una dureza relativamente baja cuando aún no ha sido expuesto a un tratamiento térmico, la cual se ve incrementada en más de 6 % después de la aplicación del mismo. Se puede considerar que el tratamiento térmico es un proceso válido para incrementar la dureza de este material, mejorando así su comportamiento en las diversas aplicaciones que puede tener.

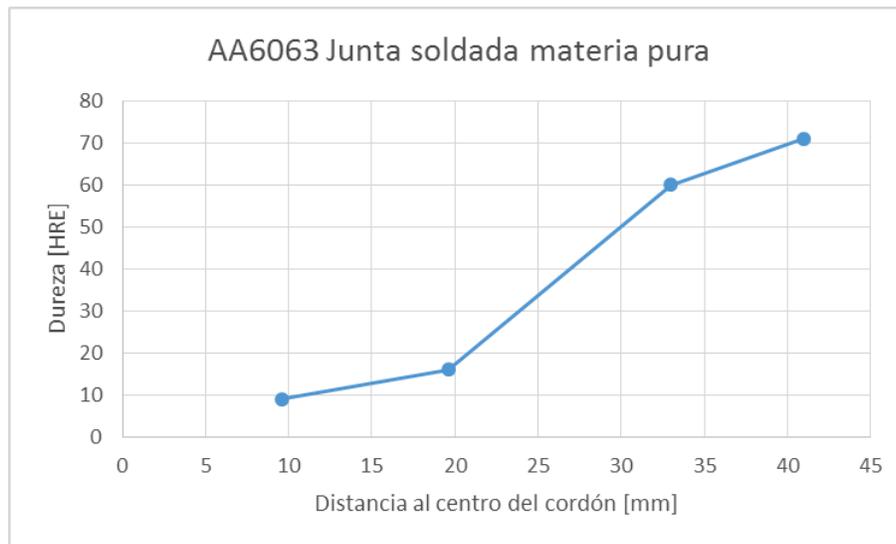


Figura 6.4 – Resultados de ensayo de dureza en AA6063-F en junta soldada

Cuando las mediciones son realizadas en una junta soldada, se puede apreciar un notable descenso en la dureza en las zonas aledañas al cordón de soldadura. Esto se debe a la aparición de la zona afectada por el calor en el momento de aplicar la soldadura, lo cual produce modificaciones en la microestructura del material, alterando así la dureza del mismo.

6.1.2 Comparación de la soldabilidad del aluminio AA6063 antes y después de la aplicación del tratamiento térmico por envejecimiento

Para analizar la soldabilidad en un material se deben realizar ensayos que permitan determinar la calidad del cordón, tanto de forma superficial como sub-superficial. Asimismo, es recomendable realizar ensayos que permitan verificar la penetración del cordón, para asegurar que la soldadura es de buena calidad y puede resistir esfuerzos externos.

En este caso particular se seleccionó el ensayo Houldcroft para el análisis superficial de la calidad del cordón y los ensayos de doblado de cara y raíz para comprobar la penetración del material de aporte en la junta.

La aleación AA6063 responde de forma favorable a los ensayos de doblado de cara y raíz. Como se desarrolla en el Capítulo 5 de este trabajo, las probetas se doblaron de forma adecuada y con mínima o nula presencia de grietas en la zona del cordón como producto del doblado, tanto si fueron o no sometidas al tratamiento térmico de envejecimiento.

En el ensayo Houldcroft, el material no presenta grietas cuando no ha sido sometido al tratamiento térmico y la calidad del cordón a nivel superficial es bastante buena. No sucede lo mismo con el material sobre el que se ha aplicado el tratamiento térmico, ya que aparecieron grietas en la superficie del cordón. Parte del ensayo Houldcroft implica calcular el porcentaje de longitud ocupado por la grieta con respecto a la longitud del cordón, lo cual se desarrolla a continuación.

Tabla 6.3 – Tamaño de las grietas encontradas en AA6063-TT

| | Tamaño (mm) | A (%) |
|-----------------|------------------------|------------------|
| Grieta 1 | 2.35 | 0.98 |
| Grieta 2 | 1.70 | 0.71 |
| Grieta 3 | 4.00 | 1.67 |
| Total | 8.05 | 3.36 |

De los resultados expresados en la tabla 6.3, se observa que la presencia de grietas es mínima y por ende el valor de A también lo es.

En general, los cordones de soldadura en la aleación AA6063 tienen buena calidad superficial, de ahí que la presencia de grietas de solidificación sea nula en las probetas que no tenían tratamiento térmico, o mínima en las que sí fueron sometidas al mismo.

6.2 ANÁLISIS DE LA RESISTENCIA MECÁNICA Y SOLDABILIDAD DEL ALUMINIO AA6061

De igual manera, para definir los cambios en la resistencia mecánica de la aleación AA6061, se realizan ensayos de tracción y dureza al material, con y sin tratamiento térmico, tanto para material base como para junta soldada.

6.2.1 Comparación de la resistencia mecánica del aluminio AA6061 antes y después de la aplicación del tratamiento térmico por envejecimiento

La resistencia mecánica de la aleación se determina con ensayos de tracción y dureza, con su respectivo análisis para material con y sin tratamiento térmico, en material base y en junta soldada. A continuación se presentan los resultados de dichos ensayos por medio de gráficos y tablas.

Tabla 6.4 – Resultados del ensayo de tracción para AA6061-F y AA6061-TT

| RESISTENCIA MECÁNICA MATERIAL BASE | | |
|------------------------------------|--------|---------|
| Condición del material | | |
| | 6061-F | 6061-TT |
| Probeta 1 [ksi] | 48.87 | 48.46 |
| Probeta 2 [ksi] | 44.15 | 48.48 |
| Promedio [ksi] | 46.51 | 48.47 |

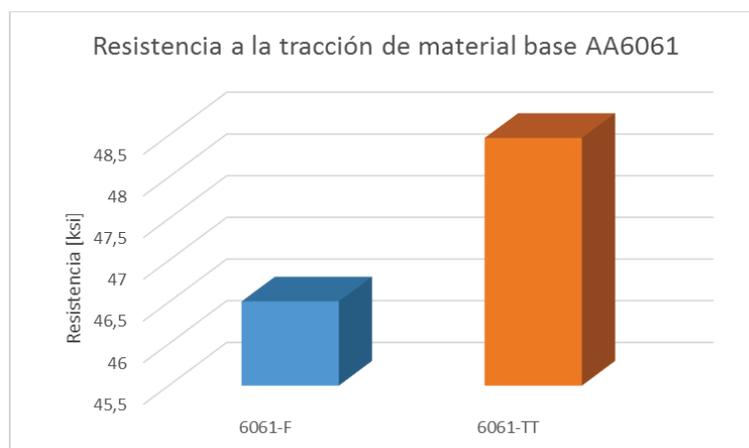


Figura 6.5 – Comparación de resultados de ensayo de tracción en AA6061-F y AA6061-TT

El tratamiento térmico aplicado a la aleación AA6061 contribuye a incrementar la resistencia mecánica en aproximadamente un 5 % de la misma, mientras que el valor de límite de fluencia se mantiene aproximadamente igual, con un ligero descenso. Por otro lado, el porcentaje de elongación disminuye, el mismo que produce cambios en el comportamiento del material y a su vez puede afectar a otras propiedades. Este material es obtenido también por un proceso de extrusión que produce la aparición de esfuerzos internos en el material, los cuales se pueden modificar mediante la aplicación de un tratamiento térmico.

Tabla 6.5 – Resultados del ensayo de tracción para AA6061-F y AA6061-TT

| | RESISTENCIA MECÁNICA JUNTA SOLDADA | |
|------------------------|---|----------------|
| | Condición del material | |
| | 6061-F | 6061-TT |
| Probeta 1 [ksi] | 17.3 | 22.6 |
| Probeta 2 [ksi] | 16.7 | 22.08 |
| Promedio [ksi] | 17 | 22.34 |

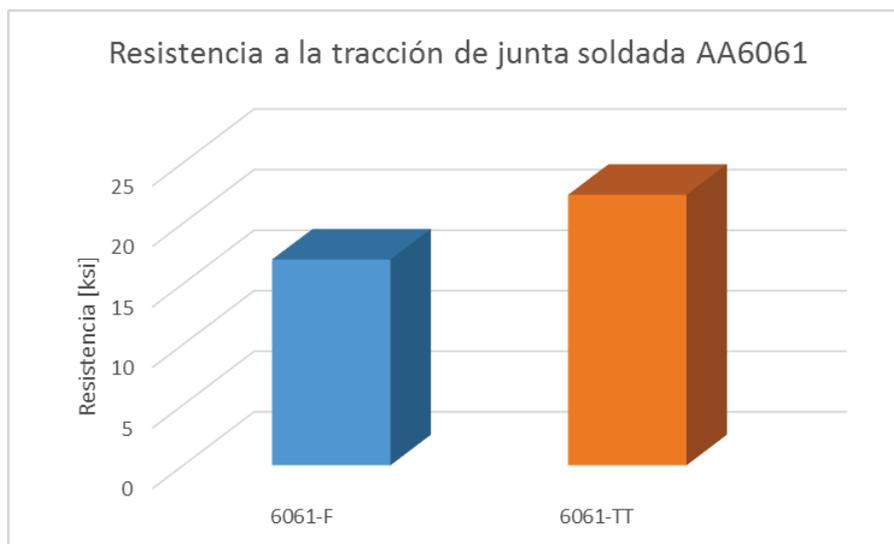


Figura 6.6 – Comparación de resultados de ensayo de tracción en AA6061-F y AA6061-TT

De manera similar, en los ensayos de tracción realizados a las juntas soldadas de AA6061, con y sin tratamiento térmico, se puede observar un aumento en la resistencia mecánica de cerca del 25 % en las probetas con tratamiento térmico, comparadas con las que no tenían dicho tratamiento. Sin embargo, en todas las probetas de AA6061 con espesor de 4.5 mm, se registró fractura en la junta

soldada, y al observar la zona fracturada, se pudo ver que el material presentaba una condición frágil, lo cual se analizará con detenimiento más adelante, mediante el estudio de las metalografías realizadas al material.

Con el fin de analizar más a fondo el comportamiento de este material, se realiza ensayos de tracción adicionales en probetas con diferentes características que las primeras, esto es, con un espesor de 1.4 mm. Estas probetas tuvieron un comportamiento diferente, mostrando una resistencia mecánica un 30 % mayor que en las de mayor espesor, y fractura fuera de la junta soldada, con fractura de apariencia dúctil y mayor elongación del material antes de ceder. Este ensayo se realizó solamente en probetas sin tratamiento térmico, ya que el objetivo principal era determinar si el espesor era influyente en los resultados.

Tabla 6.6 – Resultados del ensayo de tracción pura para AA6061-F en junta soldada

| RESISTENCIA MECÁNICA JUNTA SOLDADA | |
|---|-------|
| 6061-F | |
| Probeta 1 [ksi] | 24.66 |
| Probeta 2 [ksi] | 24.38 |
| Promedio [ksi] | 24.52 |

A su vez, también se realiza un ensayo extra con probetas de 4.5 mm de espesor, aplicando un precalentamiento a las juntas antes de soldar, y un tratamiento térmico post soldadura de recocido parcial, con el fin de hacer alivio de esfuerzos internos en la zona afectada por el calor. No obstante, al realizar el ensayo de tracción se pudo apreciar que el material también se fracturó en la junta soldada, mostrando una apariencia frágil en la zona fracturada. Esto puede atribuirse también a que, de acuerdo a la ficha técnica provista por el fabricante del material de aporte, el electrodo ER4043 no es apto para tratamiento térmico.

Tabla 6.7 – Resultados del ensayo de tracción para AA6061-TT en junta soldada

| RESISTENCIA MECÁNICA JUNTA SOLDADA | |
|---|-------|
| 6061-TT | |
| Probeta 1 [ksi] | 20.03 |

De los dos ensayos extra realizados para analizar la aleación AA6061, se puede observar que cuando el material tiene menor espesor, muestra mayor resistencia a la tracción, mientras que cuando se trabaja con mayores espesores, el material tiende a la fragilización, la cual no presenta mejoras ni siquiera al aplicar un recocido parcial post soldadura.

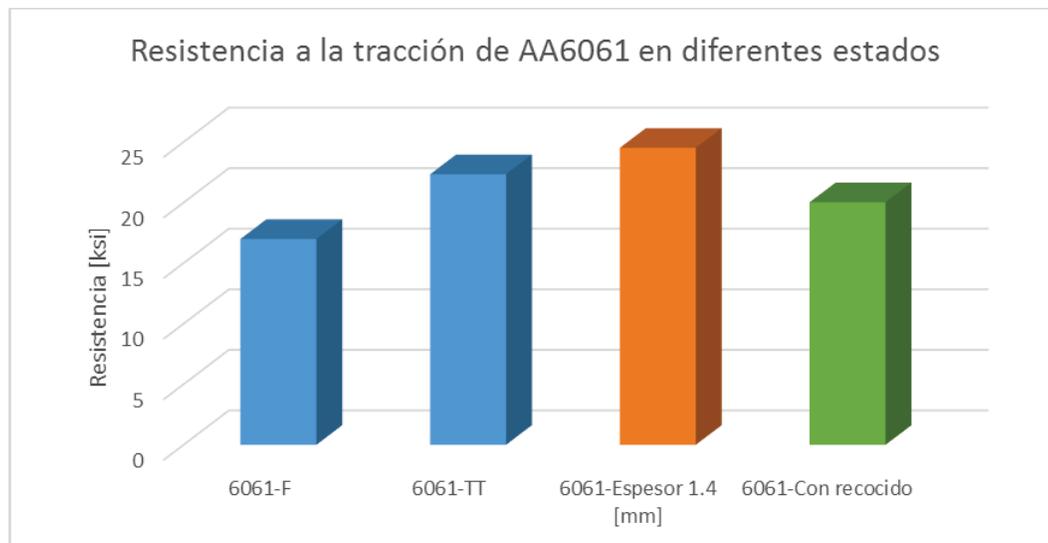


Figura 6.7 – Comparación de resistencia mecánica de AA6061 en diferentes estados

En la figura 6.7 se presenta una comparación de los valores de resistencia mecánica obtenidos en las distintas variantes realizadas para el ensayo de tracción en junta soldada para la aleación AA6061. Se puede observar que el valor más alto registrado es el de las probetas de 1.4 mm de espesor, sin tratamiento térmico. Estas probetas fueron las que mejor respondieron al ensayo, ya que la fractura fue de tipo dúctil fuera de la junta soldada.

También se realizaron mediciones de dureza en la aleación AA6061, con el objetivo de determinar cómo cambia esta propiedad al aplicar el tratamiento térmico de envejecimiento artificial. A continuación se presentan los resultados de este ensayo.

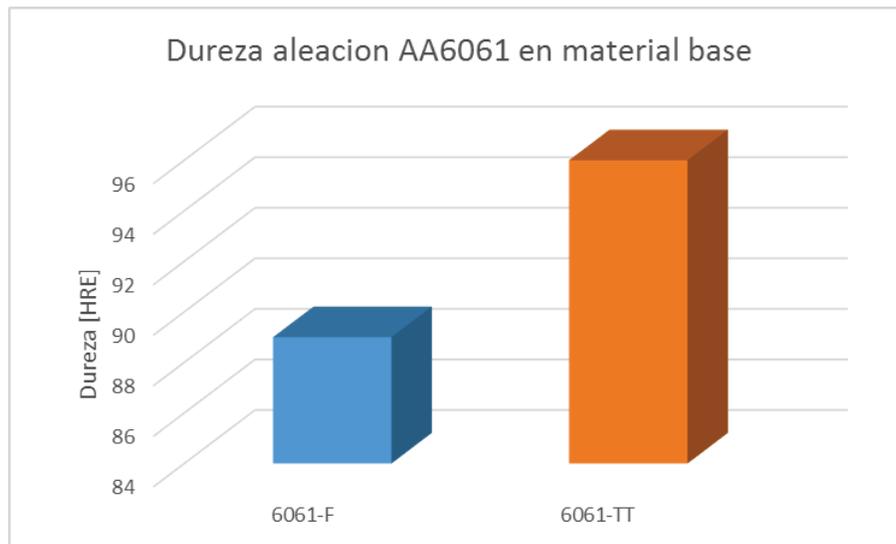


Figura 6.8 – Comparación de resultados de ensayo de dureza en AA6061-F y AA6061-TT

Como se puede observar en la figura 6.8, el tratamiento térmico de envejecimiento causa un incremento en la dureza de la aleación AA6061, lo cual lo convierte en una opción viable si se desea obtener mejoras en esta propiedad, y en general un mejor comportamiento de la aleación en sus diversas aplicaciones industriales y comerciales.

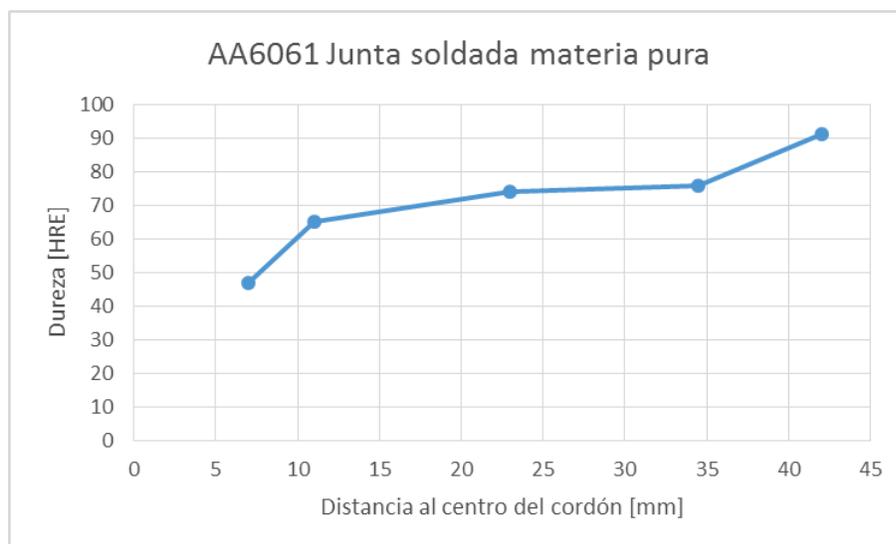


Figura 6.9 – Resultados de ensayo de dureza en AA6061-F en junta soldada

La figura 6.9 muestra los resultados de las mediciones de dureza en una junta soldada. En el caso de la aleación AA6061 se puede notar que la variación de esta propiedad, desde el centro del cordón hacia los extremos, no presenta cambios bruscos; es decir, hay menor presencia de zona afectada por el calor. Esto puede deberse, principalmente, al espesor del material con el que se está trabajando.

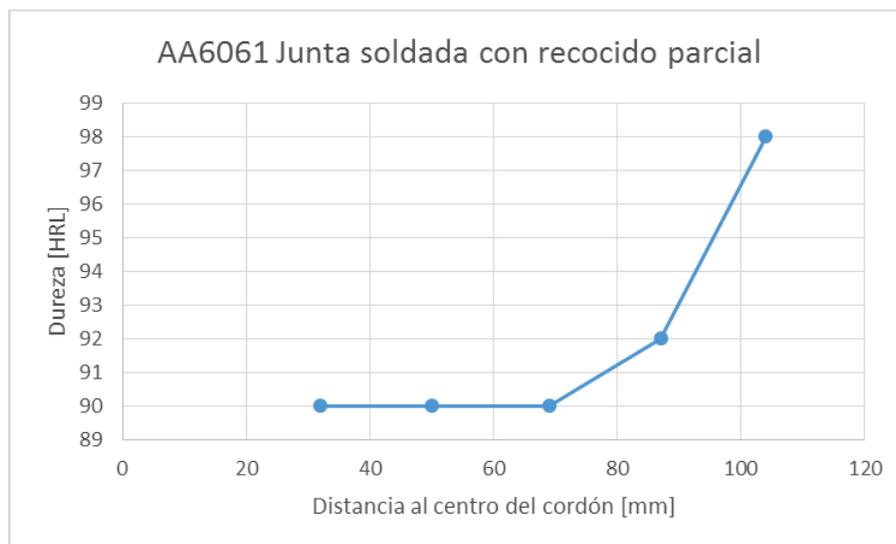


Figura 6.10 – Resultados de ensayo de dureza en AA6061-TT en junta soldada

La figura 6.10 muestra los valores de medición del ensayo de dureza en una junta soldada con precalentamiento y tratamiento térmico post soldadura de recocido parcial para la aleación AA6061. Estas medidas se toman en escala Rockwell L, ya que el material muestra un descenso en su dureza después del recocido parcial, y en este caso se puede observar cambios bruscos en la dureza conforme las mediciones se alejan del cordón de soldadura. Esto puede deberse a que el recocido parcial contribuyó al alivio de esfuerzos en la zona afectada por el calor, homogeneizando la microestructura del material, pero con un efecto contraproducente en la dureza del mismo.

6.2.2. COMPARACIÓN DE LA SOLDABILIDAD DEL ALUMINIO AA6061 ANTES Y DESPUÉS DE LA APLICACIÓN DEL TRATAMIENTO TÉRMICO POR ENVEJECIMIENTO

Para la aleación AA6061 se realizan los ensayos de doblado de cara y raíz, además del ensayo Houldcroft, con el fin de determinar la soldabilidad que presenta dicha aleación bajo el proceso de soldadura GMAW.

El doblado de cara y raíz presenta resultados negativos para todas las probetas de 4.5 mm de espesor utilizadas, ya que no se doblan de la forma esperada, sino que se fracturan en la zona del cordón de soldadura. Este comportamiento es similar al que presentan las probetas en los ensayos de tracción, dado que la fractura fue de tipo frágil. Esto puede atribuirse a un enfriamiento demasiado rápido del cordón de soldadura y la consecuente aparición de mayor cantidad de precipitados, lo que lleva al material a sufrir una fragilización por la acumulación de esfuerzos internos. Muy diferente fue el comportamiento de las probetas de 1.4 mm de espesor, ya que en este caso el material responde de la forma esperada.

El ensayo Houldcroft aplicado al material, con y sin tratamiento térmico, evidencia que el cordón tiene buena calidad a nivel superficial, y no se encuentra presencia de grietas de solidificación en ninguno de los dos casos.

6.3 ANÁLISIS DE LA RESISTENCIA MECÁNICA Y SOLDABILIDAD DE JUNTAS SOLDADAS MIXTAS DE ALUMINIOS AA6061 Y AA6063.

Con fines investigativos, se decide realizar probetas de juntas soldadas mixtas de las dos aleaciones desarrolladas de forma individual anteriormente. Se realizan ensayos de tracción, doblado de cara y raíz, y ensayo Houldcroft, con el objetivo de analizar el comportamiento de las aleaciones cuando están trabajando juntas.

6.3.1. COMPARACIÓN DE LA RESISTENCIA MECÁNICA DE JUNTAS SOLDADAS MIXTAS DE ALUMINIOS AA6061 Y AA6063 ANTES Y DESPUÉS DE LA APLICACIÓN DEL TRATAMIENTO TÉRMICO POR ENVEJECIMIENTO

En vista de que la dureza ya ha sido analizada individualmente en cada aleación en ítems anteriores, para las juntas mixtas se realiza únicamente el ensayo de tracción para analizar las características de resistencia mecánica de estas probetas.

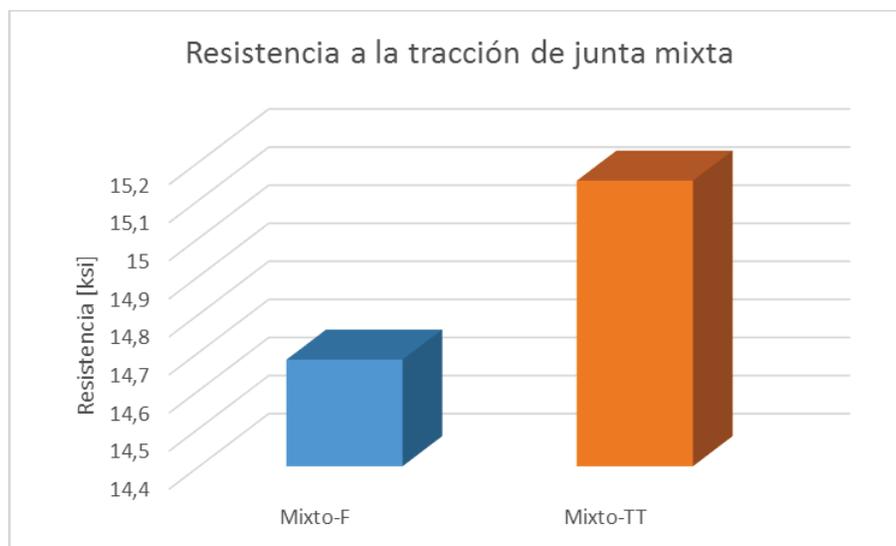


Figura 6.11 – Comparación de resultados de ensayo de tracción en Mixto-F y Mixto-TT

Como se puede observar a partir de la figura 6.11, la resistencia mecánica de las probetas mixtas presenta un incremento de cerca del 5 % cuando se ha realizado el tratamiento térmico. Una particularidad de las juntas mixtas aquí analizadas, es que presentan distintos tipos y lugares de fracturas, independientemente de si se les ha aplicado el tratamiento térmico. Se obtiene fracturas del tipo dúctil cuando la probeta falla en el material AA6063; fracturas del tipo frágil cuando falla en el cordón de soldadura; y fracturas del tipo mixto, parte dúctil y parte frágil, cuando el material falla en la zona de transición entre el cordón de soldadura y el material AA6063.

6.3.1 Comparación de la soldabilidad de juntas soldadas mixtas de aluminios AA6061 y AA6063 antes y después de la aplicación del tratamiento térmico por envejecimiento

Al igual que en el análisis de soldabilidad realizado para las aleaciones de forma individual, las juntas mixtas se sometieron a doblado de cara y raíz, y ensayo Houldcroft, utilizando probetas con y sin tratamiento térmico.

Los ensayos de doblado dan resultados satisfactorios tanto para las probetas que han sido sometidas a tratamiento térmico como para las que no, ya que se doblan de la forma esperada con mayor presencia de curvatura hacia el material AA6063.

En el ensayo Houldcroft no se encontraron grietas superficiales en el cordón, con lo cual se puede apreciar que se logró buena calidad en el mismo.

6.4 ANÁLISIS METALOGRAFICO DE LAS ALEACIONES AA6061 Y AA6063

Para poder comprender de mejor manera el comportamiento de los materiales analizados, se realiza un análisis metalográfico de cada una de las aleaciones, el cual incluye macrografías para analizar el tipo de fractura observada en cada material; y micrografías para examinar la microestructura obtenida, tanto para el material base como para la soldadura. Estos ensayos se realizan en el Laboratorio de Metalografía de la Escuela Politécnica Nacional.

La macrografía es un método que permite observar los tipos de discontinuidades presentes en la zona de fractura que pudieron haber llevado a la falla del material en ese punto. También permite analizar las características de la fractura obtenida, y determinar a ciencia cierta si ésta ha sido del tipo dúctil, frágil, o una combinación de ambas. Al mismo tiempo, también se puede determinar el punto

donde inició la fractura cuando se analiza piezas que han fallado mientras estaban en funcionamiento.

Por otro lado, la micrografía permite conocer la microestructura del material y las formaciones particulares que presentan los elementos aleantes en el producto final y determinar si la ubicación y forma de estos contribuye a la falla o fractura del material en algún punto de su vida útil, o cuando está siendo sometido a esfuerzos.

La principal referencia con la que se cuenta para realizar comparaciones de resultados de micrografías es el ASM Metals Handbook, el cual es un compendio de metalografías que muestran aproximadamente la microestructura que se espera obtener para un determinado material; las fases de precipitados que pueden aparecer en las mismas; y los cambios que pueden producirse en la microestructura al aplicar tratamientos térmicos o procesos de conformado en frío o en caliente. (ASM International, 1992)

6.4.1 Análisis metalográfico de la aleación AA6063

La aleación AA6063, cuyo comportamiento mecánico ha sido analizado en ítems anteriores, se caracteriza por ser un material maleable y del tipo dúctil, lo cual influye en el tipo de fractura que presentará el mismo.

6.4.1.1 Macrografías de AA6063-F

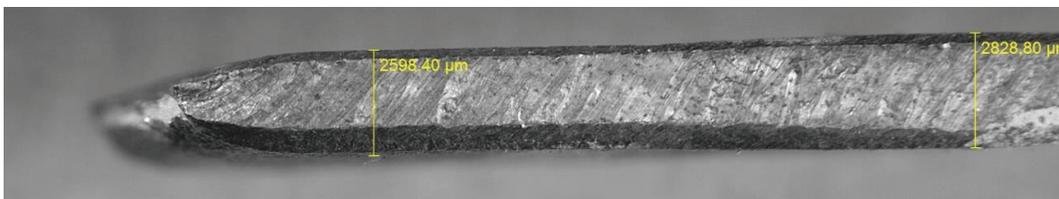


Figura 6.12 – Macrografía de fractura en AA6063-F, vista lateral

En la figura 6.12 se puede apreciar el cambio de espesor producido por los esfuerzos de tracción durante dicho ensayo.

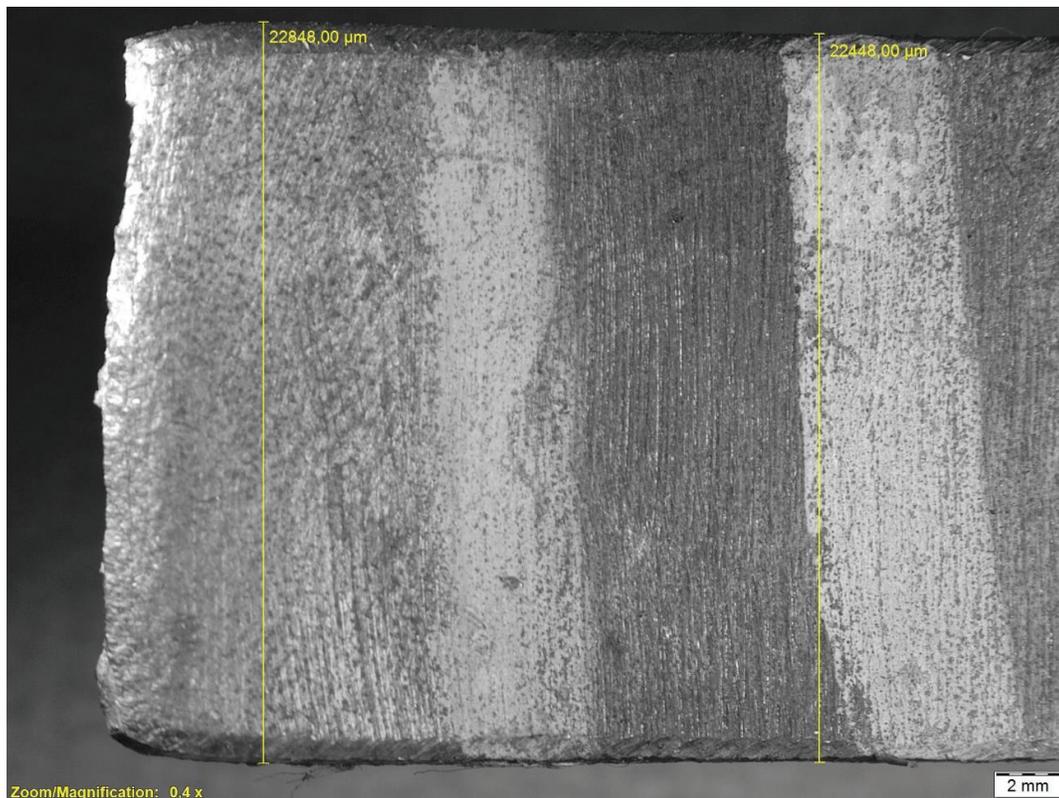


Figura 6.13 – Macrografía de fractura en AA6063-F, vista superior

En la figura 6.13 se puede apreciar la variación en el ancho de la probeta, causada por el ensayo de tracción realizado. La zona del cordón de soldadura está delimitada por las líneas blancas que se ven en la imagen. La fractura se produce fuera del cordón.

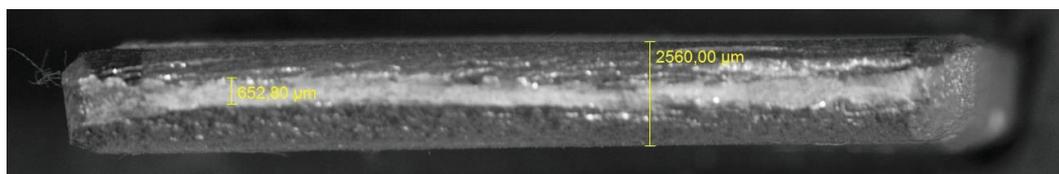


Figura 6.14 – Macrografía de fractura en AA6063-F, vista frontal

En la figura 6.14 se observa el cambio de sección que precede a la fractura del material. Esta fractura tiene una forma de copa y cono, característico de una

fractura dúctil. En este caso, corroborando con las imágenes anteriores, la probeta experimenta una elongación considerable antes de culminar en la separación del material.

6.4.1.2 Macrografías de AA6063-TT

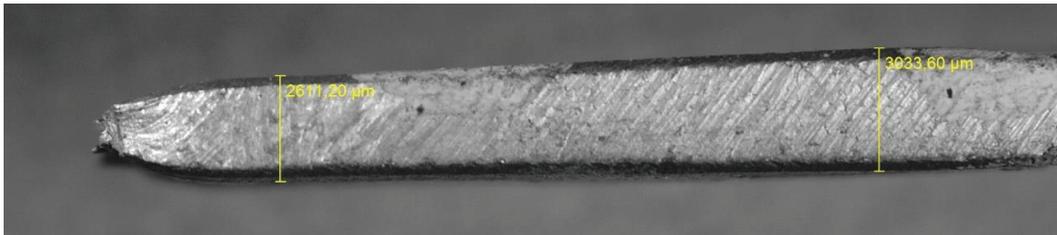


Figura 6.15 – Macrografía de fractura en AA6063-TT, vista lateral

En la figura 6.15 se aprecia el cambio en el espesor de la probeta durante el ensayo de tracción. Esto se debe a la elongación que experimenta el material durante dicho ensayo.

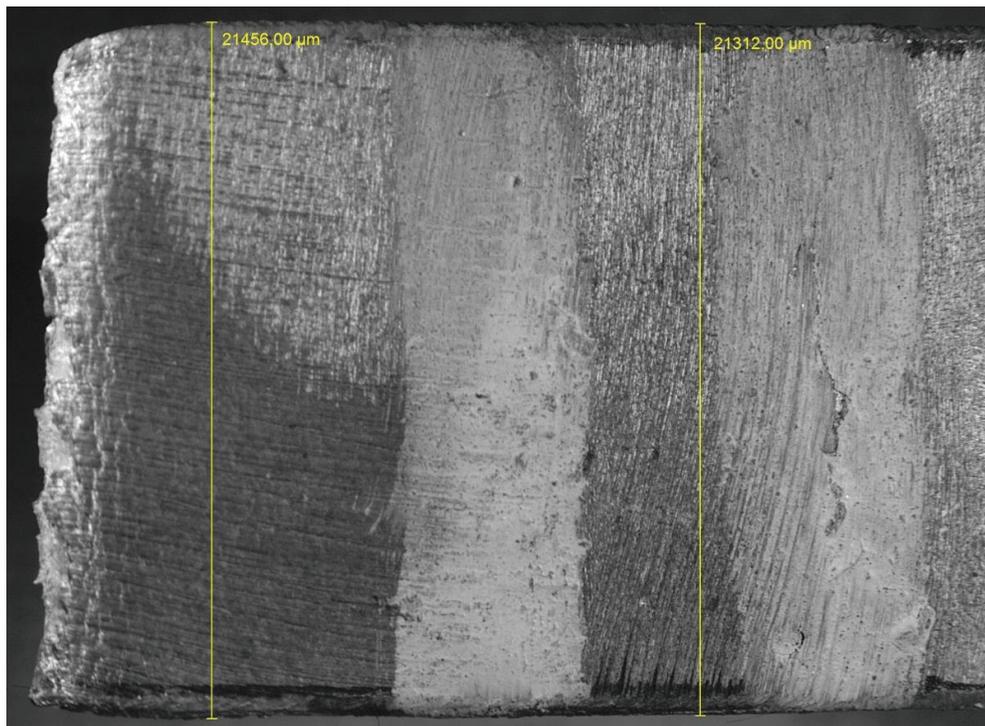


Figura 6.16 – Macrografía de fractura en AA6063-TT, vista superior

En la figura 6.16 se puede apreciar el cordón de soldadura delimitado por las líneas blancas que aparecen en la imagen. Como se puede observar, la fractura presenta un alargamiento antes de terminar en la separación del material.

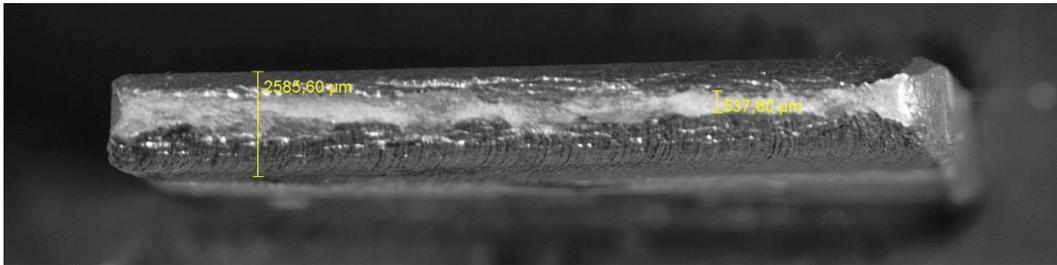


Figura 6.17 – Macrografía de fractura en AA6063-TT, vista frontal

En la figura 6.17 se observa el cambio de sección ocurrido en la probeta antes de que se dé la fractura. También se pueden observar las marcas de elongación en la superficie de las zonas aledañas a la fractura. Se observa un comportamiento del tipo dúctil, porque la zona de fractura se presenta del tipo copa y cono.

6.4.1.3 Micrografías de AA6063-F

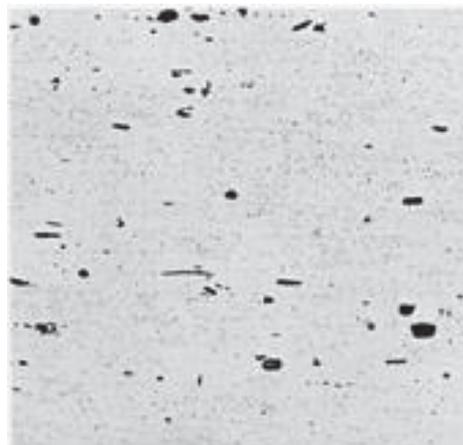


Figura 6.18 – Microestructura de AA6063-F³⁴

³⁴ ASM International. (1992). Metallography and Microstructures Vol. 9. Estados Unidos. Pág. 749

La figura 6.18 describe la microestructura que se espera obtener para la aleación AA6063-F de acuerdo a ASM Metals Handbook vol. 9. En ese mismo libro se puede encontrar una descripción de las características de la aleación, además de los precipitados que la misma puede formar, siendo estos Mg_2Si (siliciuro de magnesio), $FeAl_3$ (compuesto intermetálico), y Fe_3SiAl_{12} .

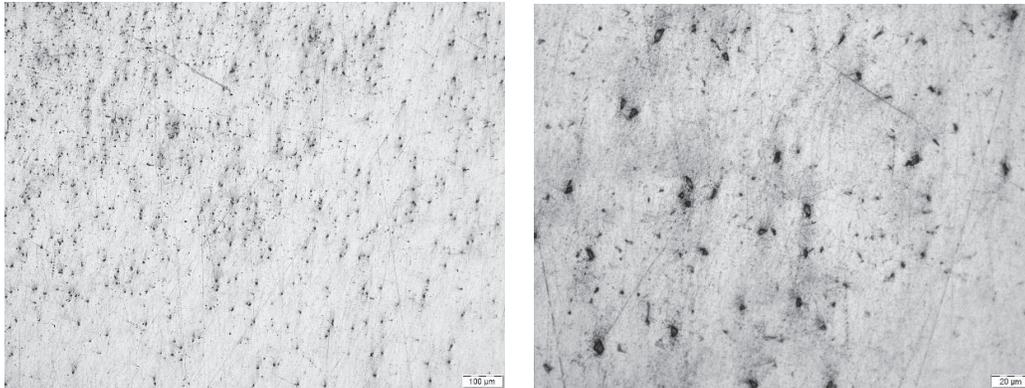


Figura 6.19 – Micrografías de AA6063-F, a 100X y 500X

En la figura 6.19 se puede apreciar la presencia de varios tipos de precipitados, entre los que se pueden destacar los siguientes: $FeAl_3$, en los puntos más oscuros; Mg_2Si , en los puntos oscuros con un centro más claro; y Fe_3SiAl_{12} , en formas alargadas de color gris claro.

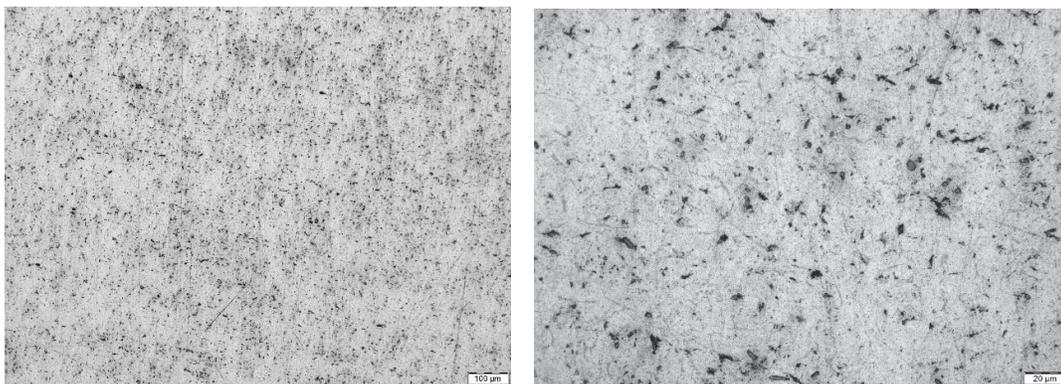


Figura 6.20 – Micrografías de material de aporte ER4043, a 100X y 500X

En el material de aporte, figura 6.20, se pueden apreciar los mismos precipitados que en el metal base, con formaciones dispersas. El analizar la micrografía del material de aporte permite ver la diferencia entre éste y el material base.

Al comparar las micrografías a 100X del material base AA6063-F con el material de aporte, se puede apreciar que el material de aporte muestra mayor presencia de precipitados.

6.4.1.4 Micrografías de AA6063-TT

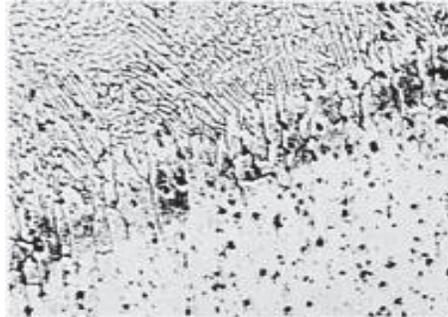


Figura 6.21 – Microestructura del material de aporte ER4043 (obsérvese la parte superior de la imagen)³⁵

La figura 6.21 describe la microestructura que se espera obtener para el material de aporte ER4043, de acuerdo a ASM Metals Handbook vol. 9. También se presentan los mismos precipitados esperados en la aleación AA6063, siendo estos Mg_2Si (siliciuro de magnesio), $FeAl_3$ (compuesto intermetálico), y Fe_3SiAl_{12} .

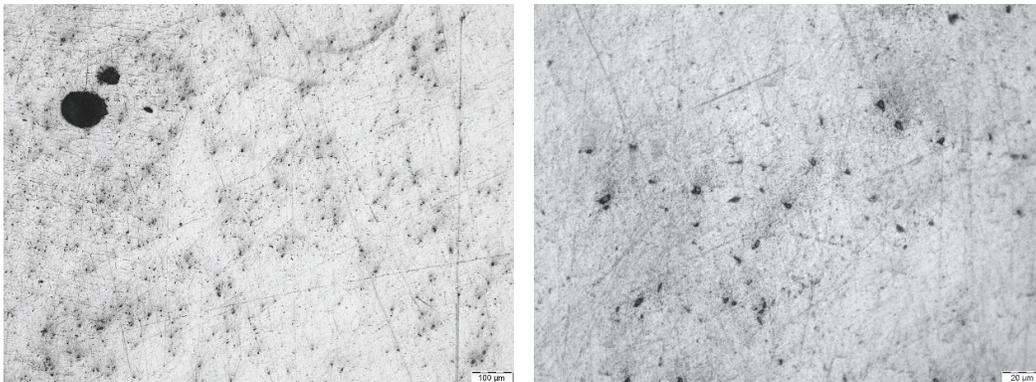


Figura 6.22 – Micrografías de AA6063-TT, a 100Xx y 500X

En el AA6063-TT se observan básicamente las mismas formaciones que en el AA6063-F: $FeAl_3$, en los puntos más oscuros; Mg_2Si , en los puntos oscuros con

³⁵ ASM International. (1992). Metallography and Microstructures Vol. 9. Estados Unidos. Pág. 749

un centro más claro; y $\text{Fe}_3\text{SiAl}_{12}$, en formas alargadas de color gris claro. No se observa una mayor presencia de precipitados, pero sí un mayor tamaño de los que se encontraban inicialmente en la aleación.

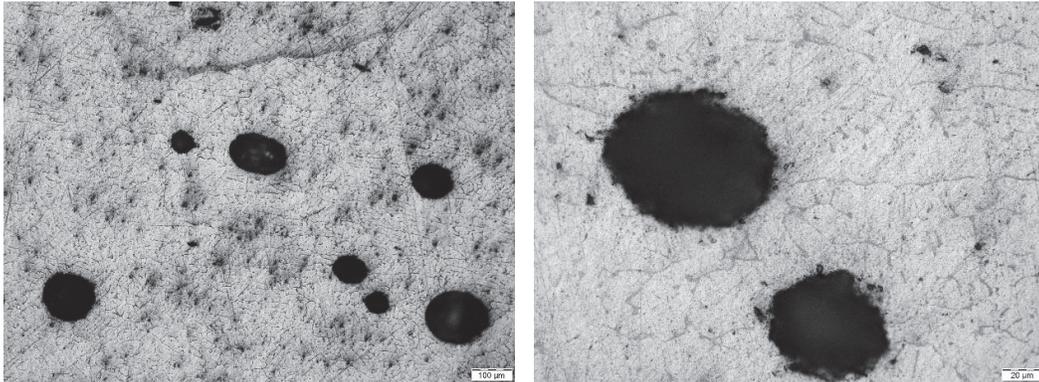


Figura 6.23 – Micrografías de material de aporte ER4043, a 100X y 500X

En la figura 6.23 se aprecia la microestructura del material de aporte obtenida en los ensayos realizados, y la microestructura esperada de acuerdo al ASM Metals Handbook. Como se puede observar, estas estructuras son similares a las presentadas en la figura 6.21, lo cual indica una concentración de precipitados similar.

Además, en la figura 6.23 también puede apreciar la presencia de poros con agrietamiento a su alrededor, lo cual puede conllevar una mayor fragilidad en el material.

6.4.2 Análisis metalográfico de la aleación AA6061

La aleación AA6061, cuyo comportamiento mecánico ha sido analizado en ítems anteriores, se caracteriza por ser un material mucho más duro y menos dúctil que la aleación AA6063, lo cual influye en el tipo de fractura que presentará el mismo.

6.4.2.1 Macrografías de AA6061-F

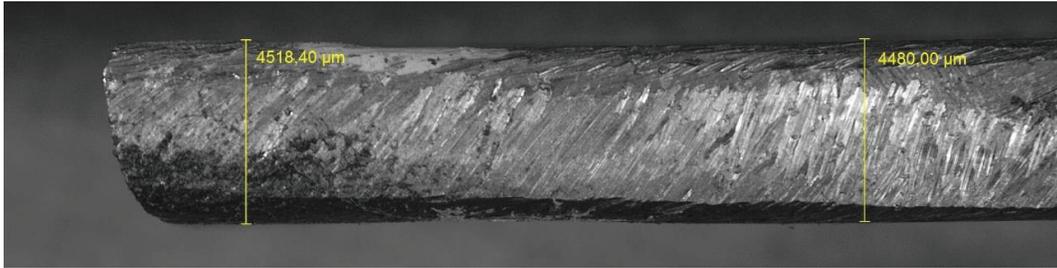


Figura 6.24 – Macrografía de fractura en AA6061-F, vista lateral

En la figura 6.24 no se aprecia una disminución evidente del espesor en las zonas cercanas a la fractura, además de que no existe una elongación aparente en la sección del material.

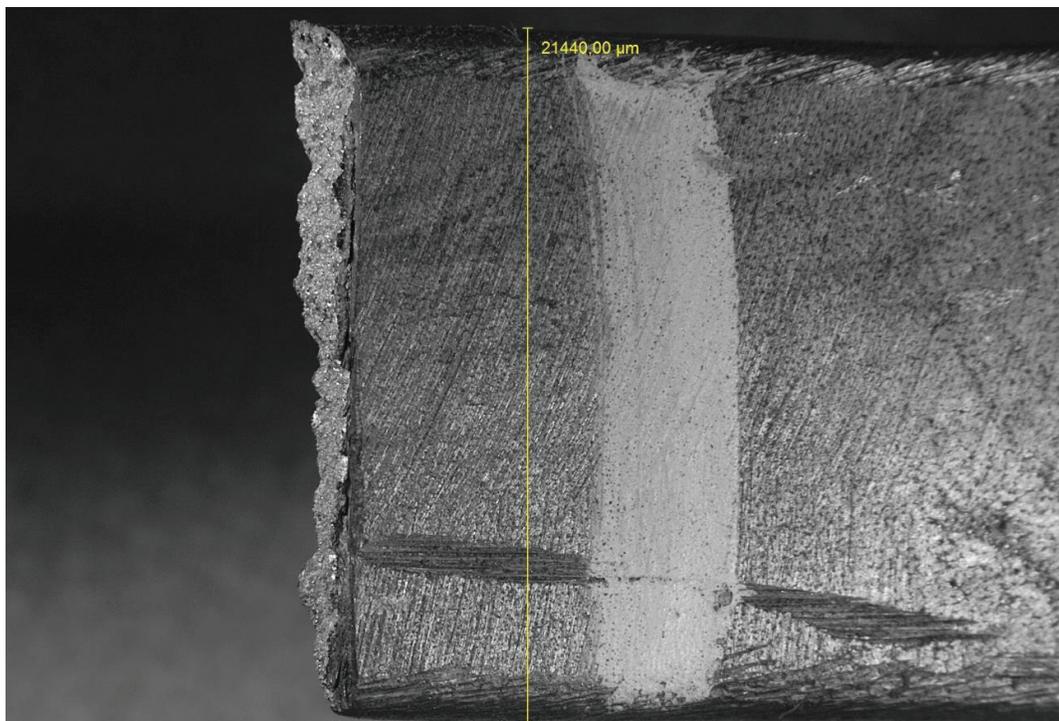


Figura 6.25 – Macrografía de fractura en AA6061-F, vista superior

En la figura 6.25 se puede apreciar que la fractura se produce en la junta soldada, y se observa que el material no presenta deformación plástica en la zona de la fractura.

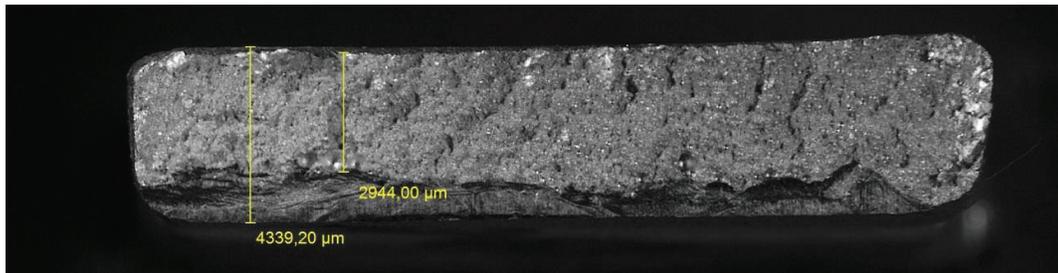


Figura 6.26 – Macrografía de fractura en AA6061-F, vista frontal

En la figura 6.26 se observa, por la presencia de zonas opacas, que el material se ha desgarrado por los esfuerzos de tracción aplicados. Esto implica una fractura de tipo frágil, la misma que se presenta en materiales de alta dureza y con casi nula deformación plástica precedente a la separación del material.

6.4.2.2 Macrografías de AA6061-TT

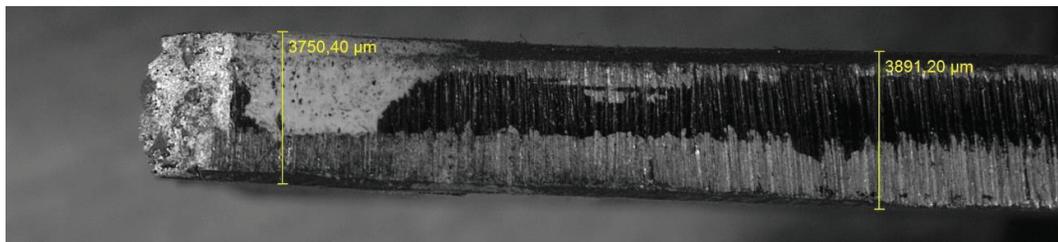


Figura 6.27 – Macrografía de fractura en AA6061-TT, vista lateral

En la figura 6.27 se puede apreciar una disminución en el espesor en la zona cercana a la fractura, además de una zona muy brillante en la misma. El material presenta la falla dentro de la junta soldada.

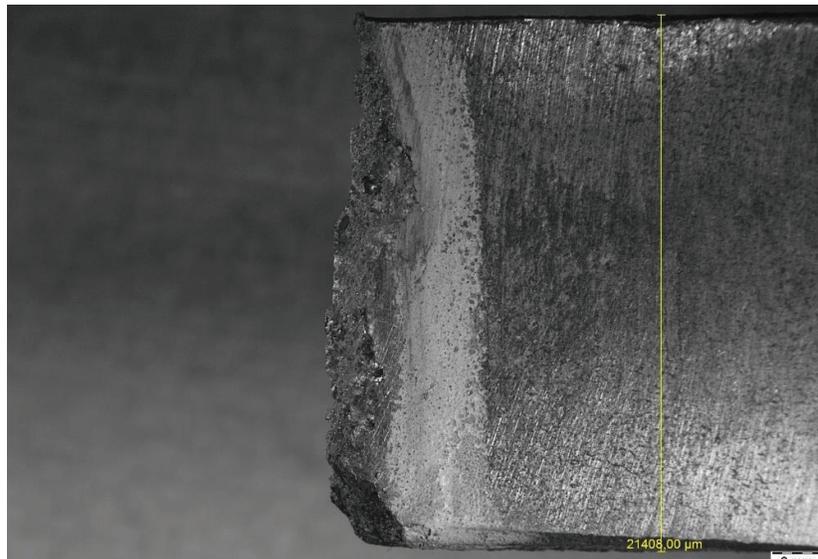


Figura 6.28 – Macrografía de fractura en AA6061-TT, vista superior

En la figura 6.28 se puede apreciar parte de la zona fracturada, en un contraste de zonas brillantes y opacas, característico de una fractura de tipo frágil.

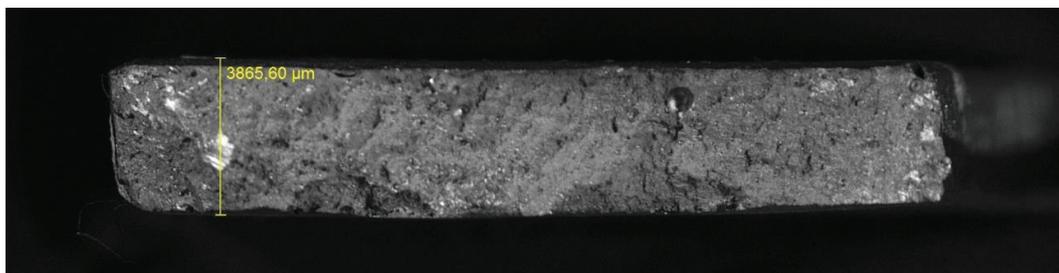


Figura 6.29 – Macrografía de fractura en AA6061-TT, vista frontal

La probeta presenta una fractura del tipo frágil, como se aprecia en la figura 6.29, de acuerdo a la presencia de zonas brillantes y opacas, las cuales son partes desgarradas del material. También se puede apreciar un poro dentro de la zona de fractura, con lo que se deduce que el mismo actuó como concentrador de esfuerzos, provocando que la fractura se presente en el plano donde el poro estaba ubicado.

6.4.2.3 Micrografías de AA6061-F

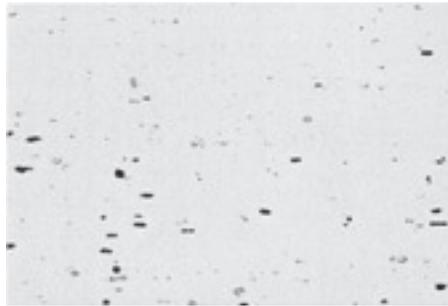


Figura 6.30 – Microestructura de AA6061-F³⁶

La figura 6.30 describe la microestructura que se espera obtener para la aleación AA6061-F de acuerdo a ASM Metals Handbook vol. 9. De acuerdo a este mismo libro, se espera precipitados del tipo Mg_2Si y Fe_3SiAl_{12} .

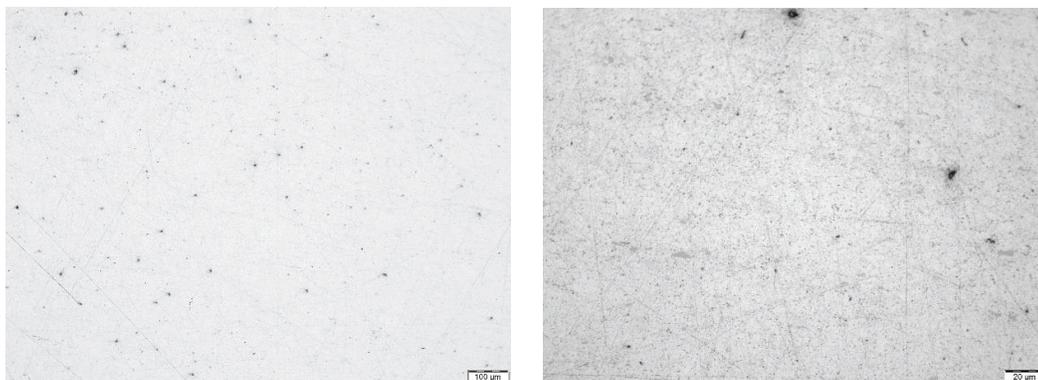


Figura 6.31 – Micrografías de AA6061-F, a 100X y 500X

En la figura 6.31 se puede apreciar que dentro de la microestructura del material se encuentran principalmente dos precipitados: Mg_2Si , en las zonas más oscuras; Fe_3SiAl_{12} en las formaciones color gris oscuro de forma alargada; y en las formaciones tipo hojuela disforme, de color gris más claro, se encuentra silicio.

³⁶ ASM International. (1992). Metallography and Microstructures Vol. 9. Estados Unidos. Pág. 748

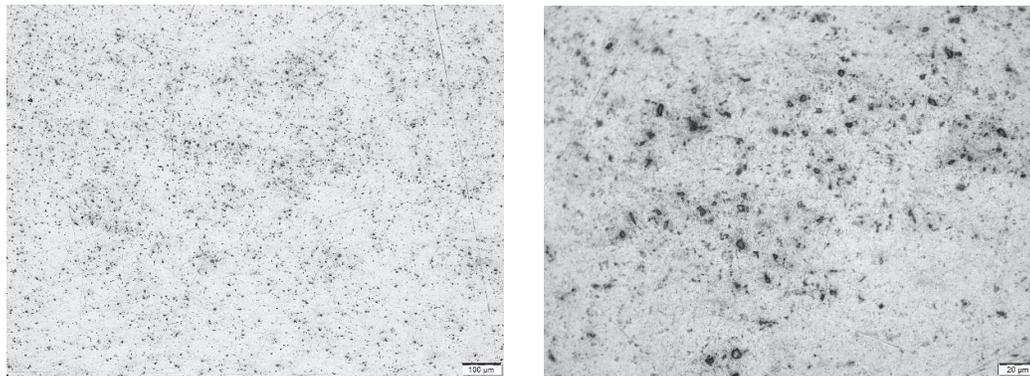


Figura 6.32 – Micrografías de material de aporte ER4043, a 100X y 500X

En el material de aporte se observa gran cantidad de precipitados, tal como se aprecia en la figura 6.32, muchos más que en el material base del AA6061-F, los mismos que se presentan en las mismas fases que en el metal base. El gran tamaño de los mismos puede llevar a una fragilización del cordón, lo cual se corroboró mediante los ensayos de tracción realizados al material.

6.4.2.4 Micrografías de AA6061-TT



Figura 6.33 – Microestructura de AA6061-TT³⁷

La imagen anterior describe la microestructura que se espera obtener para la aleación AA6061-TT de acuerdo a ASM Metals Handbook vol. 9. De acuerdo a este libro, se espera precipitados del tipo Mg_2Si y Fe_3SiAl_{12} .

³⁷ ASM International. (1992). Metallography and Microstructures Vol. 9. Estados Unidos. Pág. 790

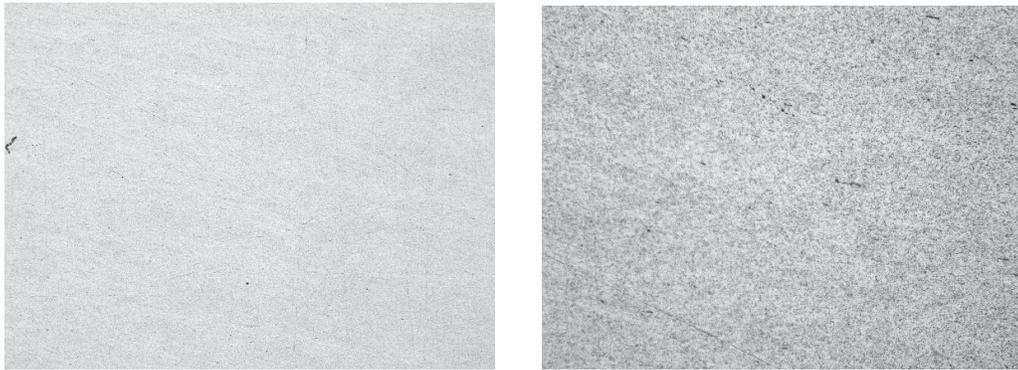


Figura 6.34 – Micrografías de AA6061-TT, a 100X y 500X

En comparación con las micrografías obtenidas para AA6061-F, las micrografías de la aleación tratada térmicamente muestran un aumento en la concentración de precipitados, de los que destacan el Mg_2Si , en las zonas de color negro; Fe_3SiAl_{12} en las formaciones de tipo alargado en color gris oscuro; y en las formaciones tipo hojuela disforme, de color gris más claro, se encuentra silicio. Este incremento en la cantidad de precipitados se debe a la aplicación del tratamiento térmico.

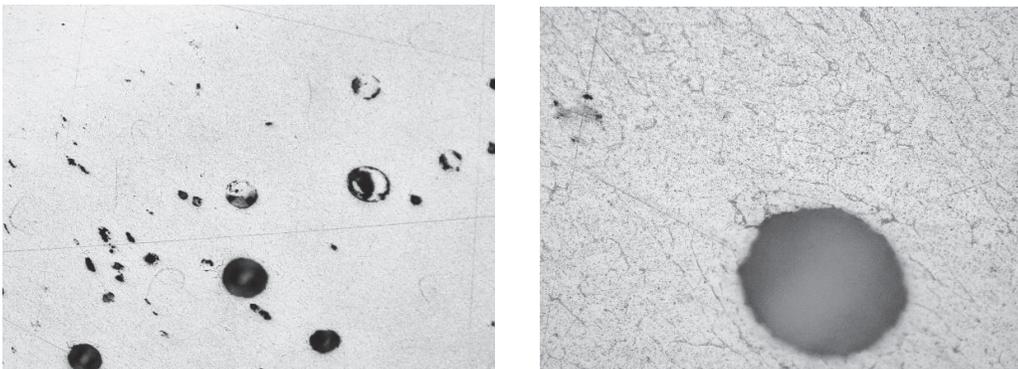


Figura 6.35 – Micrografías de material de aporte ER4043, a 100X y 500X

Al analizar la aleación AA6061-TT, figura 6.35, se puede observar la presencia de Fe_3SiAl_{12} en forma alargada a través de toda la microestructura. Además se observa $Al-Mg_2Si$ en los puntos más oscuros, el cual es un precipitado característico de la aleación. También se observa la presencia de poros con

agrietamiento a su alrededor, lo cual puede conllevar a mayor fragilización del material.

Tanto en AA6061-F como en AA6061-TT, en la zona del material de aporte se puede observar una red interdendrítica compuesta por aluminio y silicio. Al aumentar considerablemente la presencia de silicio en la zona del material de aporte, este cerámico contribuye a la fragilización del material, tal como se observó en los tipos de fractura correspondientes a esta aleación.

6.5 CALIFICACIÓN DEL PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA (PQR)

| REGISTRO DE CALIFICACIÓN DEL PROCEDIMIENTO | | | | | | |
|--|-------------|-----------------|------------------------------|--------------------|-------------------------------|------------------------|
| ESPECIFICACIONES DEL PROCEDIMIENTO | | | | | | |
| Nombre de la compañía: EPN | | | PQR No.: EPN-PQR-AM-01 | | | |
| Según norma: ASME código IX | | | Fecha: 28/07/2016 | | | |
| WPS No.: EPN-WPS-AM-01 | | | Realizado por: Sharon Abarca | | | |
| Proceso de soldadura: GMAW | | | Diego Marchán | | | |
| Posición de soldadura: 1G | | | | | | |
| ENSAYO DE TRACCIÓN | | | | | | |
| Probeta No. | Designación | Ancho (mm) | Espesor (mm) | Carga (lbf) | Resistencia (ksi) | Zona de falla |
| 1 | AA6061-T1 | 21,38 | 3,45 | 2,524 | 22,08 | Falla en junta soldada |
| 2 | AA6061-T2 | 20,35 | 3,58 | 2,552 | 22,6 | Falla en junta soldada |
| 3 | AA6061-T3 | 23,12 | 4,24 | 1,936 | 12,74 | Falla en junta soldada |
| 4 | AA6061-T4 | 20,04 | 4,28 | 2,261 | 17 | Falla en junta soldada |
| ENSAYO DE DOBLADO GUIADO | | | | | | |
| Probeta No. | Designación | Tipo de doblado | | Fisuras | Resultado | |
| 1 | AA6061-F | CARA | | | Ruptura en la zona del cordón | |
| 2 | AA6061-F | RAIZ | | | Ruptura en la zona del cordón | |
| 3 | AA6061-TT | CARA | | | Ruptura en la zona del cordón | |
| 4 | AA6061-TT | RAIZ | | | Ruptura en la zona del cordón | |
| INSPECCIÓN VISUAL | | | | TINTAS PENETRANTES | | |
| Apariencia: | | Buena | | Apariencia: | | Buena |
| Discontinuidades: | | Porosidades | | Discontinuidades: | | Porosidades |
| Observaciones: | | | | Observaciones: | | |
| Resultado: | | Aprobado | | Resultado: | | Aprobado |
| Realizado por: | | | Revisado por: | | Aprobado por: | |
| Sharon Abarca Diego Marchán | | | Ing. Diego Espinosa | | Ing. Diego Espinosa | |

| REGISTRO DE CALIFICACIÓN DEL PROCEDIMIENTO | | | | | | |
|--|-------------|---------------------|------------------------------|---------------------|-------------------|------------------------|
| ESPECIFICACIONES DEL PROCEDIMIENTO | | | | | | |
| Nombre de la compañía: EPN | | | PQR No.: EPN-PQR-AM-02 | | | |
| Según norma: ASME código IX | | | Fecha: 28/07/2016 | | | |
| WPS No.: EPN-WPS-AM-02 | | | Realizado por: Sharon Abarca | | | |
| Proceso de soldadura: GMAW | | | Diego Marchán | | | |
| Posición de soldadura: 1G | | | | | | |
| ENSAYO DE TRACCIÓN | | | | | | |
| Probeta No. | Designación | Ancho (mm) | Espesor (mm) | Carga (lbf) | Resistencia (ksi) | Zona de falla |
| 1 | AA6063-T1 | 23,13 | 2,75 | 1,939 | 19,67 | Falla en material base |
| 2 | AA6063-T2 | 20,46 | 2,54 | 1,758 | 21,82 | Falla en material base |
| 3 | AA6063-T3 | 21,45 | 2,44 | 1,759 | 21,68 | Falla en material base |
| 4 | AA6063-T4 | 21,96 | 2,47 | 1,835 | 21,83 | Falla en material base |
| ENSAYO DE DOBLADO GUIADO | | | | | | |
| Probeta No. | Designación | Tipo de doblado | Fisuras | Resultado | | |
| 1 | AA6063-F | CARA | No | Aprobado | | |
| 2 | AA6063-F | RAIZ | 2 [mm] | Aprobado | | |
| 3 | AA6063-TT | CARA | No | Aprobado | | |
| 4 | AA6063-TT | RAIZ | No | Aprobado | | |
| INSPECCIÓN VISUAL | | | | TINTAS PENETRANTES | | |
| Apariencia: | | Buena | | Apariencia: | | Buena |
| | | Porosidades | | Discontinuidades: | | Porosidades |
| Discontinuidades: | | | | Observaciones: | | |
| Observaciones: | | | | Resultado: | | Aprobado |
| Resultado: | | Aprobado | | | | |
| Realizado por: | | Revisado por: | | Aprobado por: | | |
| Sharon Abarca | | Ing. Diego Espinosa | | Ing. Diego Espinosa | | |
| Diego Marchán | | | | | | |

| REGISTRO DE CALIFICACIÓN DEL PROCEDIMIENTO | | | | | | |
|--|---------------------|-----------------|--------------|---------------------|-------------------|------------------------|
| ESPECIFICACIONES DEL PROCEDIMIENTO | | | | | | |
| Nombre de la compañía: | EPN | | | PQR No.: | EPN-PQR-AM-03 | |
| Según norma: | ASME código IX | | | Fecha: | 28/07/2016 | |
| WPS No.: | EPN-WPS-AM-03 | | | Realizado por: | Sharon Abarca | |
| Proceso de soldadura: | GMAW | | | | Diego Marchán | |
| Posición de soldadura: | 1G | | | | | |
| ENSAYO DE TRACCIÓN | | | | | | |
| Probeta No. | Designación | Ancho (mm) | Espesor (mm) | Carga (lbf) | Resistencia (ksi) | Zona de falla |
| 1 | MIXTO-T1 | 20,62 | 3,43 | 1,541 | 14,06 | Falla en junta soldada |
| 2 | MIXTO-T2 | 21,5 | 3,41 | 1,713 | 15,07 | Falla en material base |
| 3 | MIXTO-T3 | 20,96 | 3,42 | 1,700 | 15,3 | Falla en material base |
| 4 | MIXTO-T4 | 20,24 | 3,45 | 1,581 | 14,6 | Falla en junta soldada |
| ENSAYO DE DOBLADO GUIADO | | | | | | |
| Probeta No. | Designación | Tipo de doblado | | Fisuras | Resultado | |
| 1 | MIXTO-F | CARA | | No | Aprobado | |
| 2 | MIXTO-F | RAIZ | | No | Aprobado | |
| 3 | MIXTO-TT | CARA | | No | Aprobado | |
| 4 | MIXTO-TT | RAIZ | | No | Aprobado | |
| INSPECCIÓN VISUAL | | | | TINTAS PENETRANTES | | |
| Apariencia: | Buena | | | Apariencia: | Buena | |
| | Porosidades | | | | Porosidades | |
| Discontinuidades: | | | | Discontinuidades: | | |
| Observaciones: | | | | Observaciones: | | |
| Resultado: | Aprobado | | | Resultado: | Aprobado | |
| Realizado por: | Revisado por: | | | Aprobado por: | | |
| Sharon Abarca | Ing. Diego Espinosa | | | Ing. Diego Espinosa | | |
| Diego Marchán | | | | | | |

| REGISTRO DE CALIFICACIÓN DEL PROCEDIMIENTO | | | | | | |
|--|---------------------|-----------------|---------------------|--------------------|-------------------|------------------------|
| ESPECIFICACIONES DEL PROCEDIMIENTO | | | | | | |
| Nombre de la compañía: | EPN | | | PQR No.: | EPN-PQR-AM-04 | |
| Según norma: | ASME código IX | | | Fecha: | 28/07/2016 | |
| WPS No.: | EPN-WPS-AM-04 | | | Realizado por: | Sharon Abarca | |
| Proceso de soldadura: | GMAW | | | | Diego Marchán | |
| Posición de soldadura: | 1G | | | | | |
| ENSAYO DE TRACCIÓN | | | | | | |
| Probeta No. | Designación | Ancho (mm) | Espesor (mm) | Carga (lbf) | Resistencia (ksi) | Zona de falla |
| 1 | AA6061-T11 | 1,41 | 21,9 | 1177,3 | 24,66 | Falla en material base |
| 2 | AA6061-T12 | 13,7 | 21,3 | 1080,8 | 24,38 | Falla en material base |
| 3 | | | | | | |
| 4 | | | | | | |
| ENSAYO DE DOBLADO GUIADO | | | | | | |
| Probeta No. | Designación | Tipo de doblado | | Fisuras | Resultado | |
| 1 | AA6061-F1 | CARA | | No | Aprobado | |
| 2 | AA6061-F2 | RAIZ | | No | Aprobado | |
| 3 | | | | | | |
| 4 | | | | | | |
| INSPECCIÓN VISUAL | | | | TINTAS PENETRANTES | | |
| Apariencia: | Buena | | | Apariencia: | Buena | |
| | Porosidades | | | | | |
| Discontinuidades: | | | | Discontinuidades: | Porosidades | |
| Observaciones: | | | | Observaciones: | | |
| Resultado: | Aprobado | | | Resultado: | Aprobado | |
| Realizado por: | Revisado por: | | Aprobado por: | | | |
| Sharon Abarca | Ing. Diego Espinosa | | Ing. Diego Espinosa | | | |
| Diego Marchán | | | | | | |

CAPÍTULO 7

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

7.1 CONCLUSIONES

- La soldadura de las aleaciones de aluminio AA6061 y AA6063 mediante el proceso GMAW es capaz de producir uniones de buena calidad; sin embargo, existen algunas limitaciones en cuanto a la resistencia del material, la cual se ve afectada.
- El proceso de tratamiento térmico por envejecimiento artificial no influye en una mejora notable de las propiedades mecánicas de la unión soldada, puesto que la resistencia del material no cambia en gran medida.
- De acuerdo a los resultados obtenidos al experimentar con espesores superiores a 4 mm con la aleación AA6061, se observa que el material de aporte cambia su estructura interna, evidenciando un aumento de precipitados, los cuales generan una fragilización del material, afectando así las propiedades mecánicas de la unión soldada. Esto puede deberse a la alta velocidad de enfriamiento que se obtiene en piezas de mayores espesores los cuales generan una mayor presencia de precipitados en la estructura, debido a la mayor área de contacto que posee el cordón de soldadura, la misma que incrementa la transferencia de calor por conducción.
- La aleación AA6063 posee una mejor respuesta al tratamiento térmico de envejecimiento artificial, ya que las propiedades mecánicas de la misma mejoran en mayor proporción en comparación a la aleación AA6061.
- La soldadura bajo el proceso GMAW en la aleación AA6061, genera cordones de mejor calidad y con menor cantidad de discontinuidades en comparación a la aleación AA6061.
- La aleación AA6061 en menores espesores, soldada bajo el proceso GMAW, muestra mejores propiedades mecánicas en comparación a espesores mayores, así también en cuanto a la soldabilidad como es el caso de los ensayos de doblado de cara y raíz.

- La soldadura de placas mixtas de aleaciones AA6061 y AA6063 mediante el proceso GMAW es eficaz. Sin embargo, no se tiene certeza del comportamiento que tendrá la junta soldada puesto que puede comportarse con características de cualquiera de las dos aleaciones.
- En cuanto a la soldabilidad de ambas aleaciones bajo este proceso, se comprueba una buena respuesta del material en los ensayos realizados, tanto en el doblado de cara y raíz, así como en el ensayo Houldcroft, en donde se constata que el material no posee problemas de grietas debido a la solidificación del material de aporte.
- En el ensayo de doblado de cara y raíz para la aleación AA6061 se evidencia la fragilización del material de aporte para el espesor de 4.5mm; sin embargo, para el espesor de 1.4mm, el ensayo fue exitoso.
- Tanto en las aleaciones AA6061 y AA6063, se evidencia un aumento considerable de precipitados después del tratamiento térmico de las mismas, siendo esta la respuesta del material al envejecimiento artificial.
- Mediante los demás ensayos realizados se puede comprobar que, mientras mayor fue la concentración de precipitados en el material base, se presenta un aumento en el comportamiento frágil del material. Esto se hace más evidente en la aleación AA6061, en la cual se generaron mayor cantidad de precipitados.
- En el estudio de la microestructura del material de aporte se observa formaciones de redes dendríticas en ambas aleaciones, lo cual puede contribuir al comportamiento frágil observado en la aleación AA6061.
- En la soldadura de la aleación AA6061 de espesor 4.5mm se observa la aparición de micro rechupes debido a una elevada velocidad de enfriamiento después de la fabricación del cordón, los que se convierten en concentradores de esfuerzos que contribuyen al bajo desempeño que el material mostro en los ensayos, tales como el de tracción.

7.2 RECOMENDACIONES

- Se recomienda hacer tratamiento térmico post soldadura para mejorar las propiedades de la junta siguiendo las recomendaciones del fabricante del material de aporte, ya que algunos de estos electrodos no admiten tratamiento térmico conllevando a un deterioro de las propiedades de la junta.
- Es aconsejable realizar un precalentamiento de la junta antes de la soldadura, en especial cuando el metal base es la aleación AA6061 debido a la cantidad de precipitados de la aleación, los cuales pueden fragilizar al material al momento de la soldadura, como se observó en la unión del metal base de espesor 4.5mm.
- Al momento de realizar el envejecimiento artificial se recomienda la colocación adecuada de las piezas dentro del horno, procurando evitar el pandeo de las mismas y en especial que estas toquen las paredes laterales del horno o mufla puesto que, en dicho punto, la temperatura se puede elevar considerablemente a mayor velocidad e incidir en el resultado del tratamiento térmico.
- Se recomienda el uso del electrodo ER4043 cuando se busca soldaduras de mejor presentación y fácil pulido, por otra parte se recomienda el electrodo ER5356 cuando se busca una soldadura más fuerte, pero de aspecto escarchado y difícil de pulir.
- Cuando se usa aluminio que posee algún tratamiento superficial como, por ejemplo, anodizado, es recomendable el lijado o desbaste de la zona a ser soldada con la finalidad de lograr un buen arco eléctrico en la soldadura y evitar que existan problemas como mala fusión, escoria, o porosidades en exceso.
- Para la aleación AA6061, verificar la velocidad de enfriamiento después de la soldadura con la finalidad que ésta no sea demasiado elevada y pueda causar la generación de precipitados en exceso y conllevar a una fragilización del cordón.
- Para la selección de las variables de soldadura se recomienda primeramente la selección del electrodo a usarse, basándose en las

sugerencias de acuerdo a la serie y composición del metal base, y posteriormente seleccionar las variables de soldadura en base a la recomendación del fabricante del material de aporte disponible.

- Es importante tener precaución al momento de trabajar una soldadura mixta, ya que el comportamiento del material puede ser errático; es decir, comportarse en este caso como la aleación AA6061 o la AA6063, conllevando a una inestabilidad del arco y presencia de ciertos defectos o discontinuidades en el proceso.
- Se recomienda para el caso de soldaduras de materiales de espesor entre 3 y 12 mm la preparación de un bisel en "V" con ángulos entre 30 y 45 grados, dependiendo del espesor, mientras que en el caso de espesores superiores se recomienda la utilización de un bisel en X.
- Un ensayo de espectrometría de chispa puede ser muy útil para cerciorarse de la composición química exacta de la aleación con la que se está trabajando.
- Es preferible utilizar una torcha con un cable corto en la máquina cuando se use electrodo de espesores pequeños, ya que este, al ser muy endeble, puede trabarse al momento de la alimentación en la soldadura. De ser posible, el uso de una "SPOOL GUN" es recomendado para evitar cualquier atascamiento del material de aporte.
- Configurar adecuadamente el caudal del gas de protección del proceso contribuirá a evitar la formación de defectos de soldadura, en especial porosidades.
- Se sugiere controlar la velocidad de alimentación del electrodo, ya que a altas velocidades la intensidad del arco es mayor, y por ende el calor generado es mayor, conllevando a problemas como la fusión de las puntas de contacto de la pistola con el material de aporte, alterando así la continuidad del proceso de soldadura.

REFERENCIAS

- Aalbert Industries. (2015). *Aalbert Industries*. Obtenido de Temple y revenido: tratamientos térmicos en hornos atmosféricos y de vacío: <http://www.trateriber.es/pdf/Temple-Revenido.pdf>
- American Welding Society. (15 de Diciembre de 2002). Specification for bare aluminum and aluminum alloy welding electrodes and rods. Miami, Florida, USA.
- American Welding Society. (15 de Diciembre de 2002). Specification for Bare Aluminum and Aluminum Alloy Welding Electrodes and Rods. Estados Unidos.
- American Welding Society. (01 de Diciembre de 2003). Structural welding code for aluminum. Miami, Florida, USA.
- Askeland, D. (1998). *Ciencia e Ingeniería de los materiales* . Mexico: International Thomson Editores.
- Askeland, D., & Phulé, P. (2004). *Ciencia e Ingeniería de los Materiales* (Cuarta ed.). Ciudad de México, México D.F., México: Thomson Editores. Recuperado el 13 de Marzo de 2016
- ASM International. (1992). Metallography and Microstructures Vol. 9. Estados Unidos.
- ASM International. (1993). Welding, brazing and soldering. Estados Unidos.
- ASME. (1 de Julio de 2010). Qualification Standard for Welding and Brazing Procedures, Welders, Brazers and Welding and Brazing Operators. Nueva York, Nueva York, Estados Unidos.
- ASTM. (Junio de 2004). Standard Test Methods for Rockwell Hardness and Rockwell Superficial Hardness of Metallic Materials. (A. International, Ed.) West Conshohocken, PA, Estados Unidos. Recuperado el 01 de 07 de 2016
- ASTM. (21 de Julio de 2016). Standard Practice for Liquid Penetrant Examination for General Industry. Estados Unidos.
- ASTM. (25 de Julio de 2016). Standard Test Method for Liquid Penetrant Examination. Estados Unidos.
- Aufhauser Corporation. (2016). *Aufhauser*. Recuperado el 19 de 07 de 2016, de Aufhauser: http://brazing.com/Pdf/Aluminum%20Data%20Sheets/AL_4043.pdf
- Avner, S. (1995). *Introducción a la metalurgia física* (Segunda ed.). (J. L. Estrada Haen, Trad.) Ciudad de México, México D.F., México: McGraw Hill. Recuperado el 13 de Marzo de 2016

- AWS. (6 de Febrero de 2003). Structural Welding Code-Aluminium. *Norma AWS D1.2/D1.2M:2003*(4ta Edición). Miami, Florida, Estados Unidos.
- Bohórquez, C., Sierra Cetina, M., & Lemus, J. (2010). Influencia del tratamiento térmico de envejecimiento en las propiedades mecánicas de los aluminios 6061 T6 y 6063 T5. *AVANCES: Investigación en Ingeniería*, 21-25.
- Caballero, N., & Figueroa, G. (2010). Medios de enfriamiento para el temple. *Ingeniería Mecánica 2*, 63-66.
- Callister, W. J. (2007). *Materials Science and Engineering*. New York: John Wiley & Sons, Inc.
- Cavazos García, J. L. (1998). *Tratamiento térmico en una aleación de aluminio 6063*. San Nicolás de los Garza: Universidad Autónoma de Nuevo León.
- Cebora. (17 de Julio de 2016). Manual de instrucciones para soldadora de hilo. Bologne, Italia.
- David, S., & Woodhouse, J. (1987). Weldability tests for thin sheet materials. *Welding Journal*, 130s-134s.
- De Frenza, J., Leañez, M., Sáenz, L., & Caralli D'Ambrosio, A. (2006). Influencia del tratamiento térmico de envejecimiento sobre el comportamiento mecánico de la aleación de aluminio 6063. *Revista Ingeniería UC*, 19-25.
- EPN. (Abril de 2016). WPS Laboratorio de Soldadura. Quito, Pichincha, Ecuador.
- Eyheralde, M. (30 de 06 de 2012). *Consejo de Educación Técnico Profesional Universidad del Traajo del Uruguay*. Recuperado el 17 de 07 de 2016, de Campus Virtual CETP/UTU: <http://campusvirtual.edu.uy/archivos/mecanica-general/soldadura/09%20Proceso%20GMAW%20FCAW.pdf>
- Gómez de Salazar, J. M., Ureña, A., Villauriz, E., Manzanedo, S., & Barrena, I. (1998). Soldadura TIG y MIG. *Revista de Metalurgia*, 276-280.
- Groover, M. (2007). *Fundamentos de manufactura moderna* (Tercera edición ed.). Mexico: McGraw-Hill Interamericana.
- Infoacero. (30 de Marzo de 2016). *Infoacero*. Obtenido de <http://www.infoacero.cl/acero/efectos.htm>
- Ingemecánica. (07 de Marzo de 2016). *Ingeniería, consultoría e información*. Obtenido de <http://ingemecanica.com/tutorialsemanal/tutorialn110.html#seccion11>

- Inspección y sistemas de calidad. (17 de Julio de 2016). *SlideShare*. Obtenido de Inspección de soldadura AWS: <http://es.slideshare.net/clarksuper/aws-curso-de-inspeccion-de-soldadura>
- Instituto Ecuatoriano de Normalización. (30 de Marzo de 2016). *Instituto Ecuatoriano de Normalización*. Obtenido de <http://www.normalizacion.gob.ec/>
- Kalpakjian, S., & Schmid, S. (2008). *Manufactura, ingeniería y tecnología* (Quinta ed.). (P. Hall, Ed., & J. Espinosa Limón, Trad.) Ciudad de México, México D.F., México: Pearson Education. Recuperado el 08 de Marzo de 2016
- Kolarik, L., Kovanda, K., Valova, M., Vondrous, P., & Dunovsky, J. (Mayo de 2011). Weldability test of precipitation hardenable aluminum alloy 6082T6. Praga, República Checa.
- Kou, S. (2003). *Welding Metallurgy*. New Jersey: Wiley-Interscience.
- Krüger, U. (1994). Weldability in aluminum. Berlín, Alemania.
- Lean Sifuentes, P. (30 de Marzo de 2016). *Scribd*. Obtenido de <https://es.scribd.com/doc/259848579/soldabilidad-Del-Aluminio-y-Sus-Aleaciones>
- Linde. (2009). *The Linde group*. Recuperado el 20 de 07 de 2016, de Linde gas Ec: <http://edition.pagesuite-professional.co.uk/launch.aspx?referral=mypagesuite&pnum=&refresh=Re901Ma8A71z&EID=8708b104-6854-4008-be6d-56b418b1fd24&skip>
- MailxMail. (17 de Julio de 2016). *Curso de Soldadura paso a paso*. Obtenido de <http://www.mailxmail.com/curso-soldadura-arco-manual-electrico-fundamentos/soldadura-tope-chaflan-bisel-simple>
- Messler, Jr., R. (2004). *Principles of welding: Processes, Physics, Chemistry and Metallurgy*. Weinheim: Wiley-VCH.
- Messler, R. (2004). *Principles of Welding Processes, Physics, Chemistry, and Metallurgy*. NY: Wiley-Vch.
- Obando, J., & Sánchez, E. (2015). Tratamientos térmicos para aluminios. *Metal Actual*, 36-43.
- Ortolá, S. (2009 de Abril de 2009). *Blog de Ingeniería Mecánica*. Recuperado el 17 de Julio de 2016, de Ingeniería Mecánica Magazine Online: <https://ingenieriademateriales.wordpress.com/2009/04/17/manual-del-aluminio-y-sus-aleaciones/>

- Osorio, V. (1987). Evolución del ensayo Varestraint. *Remetallica*, 50-54. Recuperado el 06 de abril de 2016, de <http://www.revistas.usach.cl/ojs/index.php/remetallica/article/viewFile/1760/1639>
- PennState College of Engineering. (08 de Marzo de 2016). *PennState College of Engineering*. Obtenido de Engineering Science and Mechanics: http://www.esm.psu.edu/courses/emch13d/design/design-tech/materials/aluminum_alloys.html
- Speedy Metals. (23 de Febrero de 2016). *Speedy Metals*. Obtenido de <http://www.speedymetals.com/information/Material74.html>
- Tecnosefarad. (14 de 04 de 2016). *Tecnosefarad*. Obtenido de http://www.tecnosefarad.com/wp-content/archivos/bach_2/materiales/T3_tratamientos_termicos.pdf
- The Aluminium Association. (07 de Marzo de 2016). *The Aluminium Association*. Obtenido de <http://www.aluminum.org/resources/industry-standards/aluminum-alloys-101>
- The Aluminum Association. (Noviembre de 1968). Specifications for aluminum structures. Arlington, Virginia, USA.
- The Aluminum Association. (01 de Junio de 2005). Aluminum Design Manual. Arlington, Virginia, USA. Obtenido de <http://www.aluminum.org/news/2015-edition-aluminum-design-manual-released>
- The Lincoln Electric Company. (17 de Julio de 2016). *Lincoln Electric*. Obtenido de <http://www.lincolnelectric.com/es-es/support/welding-how-to/Pages/guide-aluminum-welding-detail.aspx>
- Trateriber. (14 de 04 de 2016). *Trateriber*. Obtenido de <http://www.trateriber.es/pdf/Temple-Revenido.pdf>
- Universidad Politécnica de Valencia. (08 de Marzo de 2016). *Universidad Politécnica de Valencia*. Obtenido de Aleaciones para ingeniería: http://www.upv.es/materiales/Fcm/Fcm13/fcm13_4.html
- Wikispaces. (07 de Marzo de 2016). *Proyecto Aluminio*. Obtenido de <https://www.google.com.ec/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=2&cad=rja&uact=8&ved=0ahUKEwi8mPLq-q7LAhUH7R4KHSWvCooQFgggMAE&url=https%3A%2F%2Fproyectoaluminio>.

wikispaces.com%2Ffile%2Fview%2FPropiedades%2Bmec%25C3%25A1nicas%2Bdel%2Baluminio.doc&usg=AFQj

ANEXOS

ANEXO A – ESPECTROMETRÍA DE CHISPA PARA AA6061

CORPORACION ECUATORIANA DE ALUMINIO S.A
FO-FN-06 - Resultado de Análisis de Espectrómetro
NORMA TECNICA NTE INEN 2250:2013



Resultados Químicos

| | | | |
|----------------------------|-----------------------|--------------------------|-----------------------|
| Número de Muestra: | PRUEBA PV 6061 | Proveedor: | CEDAL |
| Cliente: | CEDAL | Hora de chispeo: | 16H50 |
| Turno: | TERCERO | Fecha de chispeo: | 20/06/2016 |
| Inspector de Turno: | E YANEZ | Fecha de colada: | 20/06/2016 |
| Aleación: | 6061 | Nombre Colada: | MUESTRA PERFIL |

Análisis espectrométrico Foundry-MASTER Grado :

| | Al | Si | Fe | Cu | Mn | Mg | Zn | Cr |
|-----|------|-------|-------|-------|--------|-------|--------|--------|
| 1 | 97,7 | 0,606 | 0,190 | 0,208 | 0,0193 | 0,980 | 0,0188 | 0,0695 |
| 2 | 97,8 | 0,587 | 0,201 | 0,198 | 0,0157 | 1,00 | 0,0200 | 0,0669 |
| 3 | 97,8 | 0,559 | 0,203 | 0,188 | 0,0157 | 0,988 | 0,0195 | 0,0655 |
| Ave | 97,8 | 0,584 | 0,198 | 0,198 | 0,0169 | 0,989 | 0,0194 | 0,0673 |

| | Ni | Ti | Be | Ca | Li | Pb | Sn | Sr |
|-----|--------|--------|----------|--------|--------|----------|----------|----------|
| 1 | 0,0156 | 0,0249 | < 0,0001 | 0,0055 | 0,0001 | 0,0021 | 0,0346 | < 0,0001 |
| 2 | 0,0080 | 0,0232 | < 0,0001 | 0,0037 | 0,0001 | < 0,0020 | 0,0154 | < 0,0001 |
| 3 | 0,0082 | 0,0215 | < 0,0001 | 0,0021 | 0,0001 | < 0,0020 | < 0,0075 | < 0,0001 |
| Ave | 0,0106 | 0,0232 | < 0,0001 | 0,0038 | 0,0001 | < 0,0020 | 0,0183 | < 0,0001 |

| | V | Na | Bi | Zr | B | Ga | Cd | Co |
|-----|--------|----------|--------|----------|----------|----------|--------|----------|
| 1 | 0,0124 | > 0,0350 | 0,0135 | < 0,0030 | < 0,0005 | < 0,0010 | 0,0019 | < 0,0030 |
| 2 | 0,0113 | 0,0087 | 0,0073 | < 0,0030 | < 0,0005 | < 0,0010 | 0,0038 | < 0,0030 |
| 3 | 0,0107 | 0,0038 | 0,0074 | < 0,0030 | < 0,0005 | < 0,0010 | 0,0027 | < 0,0030 |
| Ave | 0,0115 | 0,0158 | 0,0094 | < 0,0030 | < 0,0005 | < 0,0010 | 0,0028 | < 0,0030 |

| | Ag |
|-----|----------|
| 1 | < 0,0010 |
| 2 | < 0,0010 |
| 3 | < 0,0010 |
| Ave | < 0,0010 |


CONTROL DE CALIDAD

APROBADO RECHAZADO

Nombre: _____
 Firma: _____
 Obs.: _____
Jefe de Turno
E YANEZ

Fecha
16.06.2016

Jefe de Fundición
ING IVAN GRANDA

ANEXO B – ESPECTROMETRÍA DE CHISPA PARA AA6063

CORPORACION ECUATORIANA DE ALUMINIO S.A
FO-FN-06 - Resultado de Análisis de Espectrómetro
NORMA TECNICA NTE INEN 2250:2013



Resultados Químicos

Número de Muestra: 120634HO Proveedor: CEDAL
 Cliente: CEDAL Hora de chispeo: 08H15
 Turno: SEGUNDO Fecha de chispeo: 2016/06/16
 Jefe de Turno: E YANEZ Fecha de colada: 2016/06/16
 Aleación: 6063 Nombre Colada: LINGOTE HOMOGENIZADO

Análisis espectrométrico Foundry-MASTER Grado :

| | | | | | | | | |
|-----|----------|----------|----------|----------|----------|--------|----------|----------|
| | Al | Si | Fe | Cu | Mn | Mg | Zn | Cr |
| 1 | 98,7 | 0,512 | 0,176 | 0,0216 | 0,0187 | 0,458 | < 0,0050 | < 0,0010 |
| 2 | 98,7 | 0,503 | 0,175 | 0,0204 | 0,0185 | 0,464 | < 0,0050 | 0,0017 |
| 3 | 98,7 | 0,514 | 0,179 | 0,0222 | 0,0196 | 0,454 | < 0,0050 | 0,0014 |
| Ave | 98,7 | 0,510 | 0,177 | 0,0214 | 0,0189 | 0,459 | < 0,0050 | 0,0013 |
| | Ni | Ti | Be | Ca | Li | Pb | Sn | Sr |
| 1 | 0,0052 | 0,0183 | < 0,0001 | < 0,0005 | 0,0004 | 0,0050 | 0,0095 | < 0,0001 |
| 2 | 0,0067 | 0,0172 | < 0,0001 | < 0,0005 | 0,0004 | 0,0066 | 0,0101 | < 0,0001 |
| 3 | 0,0058 | 0,0176 | < 0,0001 | < 0,0005 | 0,0004 | 0,0041 | < 0,0075 | < 0,0001 |
| Ave | 0,0059 | 0,0177 | < 0,0001 | < 0,0005 | 0,0004 | 0,0053 | 0,0086 | < 0,0001 |
| | V | Na | Bi | Zr | B | Ga | Cd | Co |
| 1 | 0,0112 | 0,0045 | < 0,0050 | < 0,0010 | < 0,0010 | 0,0136 | < 0,0010 | < 0,0010 |
| 2 | 0,0114 | 0,0318 | < 0,0050 | < 0,0010 | < 0,0010 | 0,0135 | < 0,0010 | < 0,0010 |
| 3 | 0,0112 | 0,0039 | < 0,0050 | < 0,0010 | < 0,0010 | 0,0142 | < 0,0010 | < 0,0010 |
| Ave | 0,0113 | 0,0134 | < 0,0050 | < 0,0010 | < 0,0010 | 0,0138 | < 0,0010 | < 0,0010 |
| | Ag | Hg | In | Ce | La | | | |
| 1 | < 0,0010 | < 0,0025 | < 0,0020 | 0,0068 | 0,0025 | | | |
| 2 | < 0,0010 | < 0,0025 | < 0,0020 | 0,0066 | 0,0022 | | | |
| 3 | < 0,0010 | < 0,0025 | < 0,0020 | 0,0067 | 0,0021 | | | |
| Ave | < 0,0010 | < 0,0025 | < 0,0020 | 0,0067 | 0,0023 | | | |



CONTROL DE CALIDAD

APROBADO



RECHAZADO



Nombre: _____

Firma: _____

Obs.: _____

Jefe de Turno
E YANEZ

Fecha
16/06/2016

Jefe de Fundición
Ing.Hernan Navas

ANEXO C – FICHA TÉCNICA DE ELECTRODO ER4043, MARCA AUFHAUSER



Aluminum 4043

Aufhauser
Corporation
39 West Mall
Plainview, NY 11803
Telephone:
516-694-8696
800-645-9486
Fax:
516-694-8690

◆ TYPICAL GMAW PARAMETERS

| Wire diameter | Range | | Base material thickness | Suggested | | | Wire feed | Gas flow | Consumption 100 ft of weld |
|---------------|---------|-------|-------------------------|-----------|--------|------|-----------|----------|----------------------------|
| | Inches | Amps | | Volts | Inches | Amps | | | |
| 0.030 | 60-170 | 13-24 | 0.062 | 90 | 22 | 260 | 25 | 1.5 | |
| | | | 0.094 | 110 | 23 | 320 | | | 1.8 |
| | | | 0.125 | 130 | 23 | 380 | | | 2 |
| | | | 0.187 | 150 | 24 | 430 | | | 4 |
| | | | 0.250 | 175 | 24 | 510 | | | 6 |
| 0.035 | 70-180 | 15-26 | 0.062 | 90 | 23 | 250 | 35 | 1.5 | |
| | | | 0.125 | 130 | 24 | 360 | | | 2 |
| | | | 0.250 | 170 | 25 | 470 | | | 6 |
| 0.047 | 140-260 | 20-29 | 0.094 | 110 | 25 | 215 | 45 | 1.8 | |
| | | | 0.125 | 150 | 26 | 290 | | | 2 |
| | | | 0.250 | 190 | 26 | 370 | | | 6 |
| | | | 0.375 | 220 | 27 | 430 | | | 16 |
| 0.062 | 190-350 | 25-30 | 0.250 | 200 | 26 | 190 | 55 | 6 | |
| | | | 0.375 | 230 | 27 | 215 | | | 16 |
| | | | 0.500 | 260 | 28 | 240 | | | 30 |
| | | | 0.750 | 280 | 29 | 261 | | | 50 |
| | | | 1.000 | 300 | 30 | 280 | | | 105 |
| 0.094 | 280-400 | 26-31 | 0.500 | 280 | 28 | 170 | 65 | 30 | |
| | | | 0.750 | 290 | 29 | 175 | | | 50 |
| | | | >1.000 | 300 | 30 | 180 | | | 150+ |

NOTE: Parameters based on flat position, groove joint, backing strip, and 100% argon gas.

ANEXO D – FICHA TÉCNICA DE GAS DE PROTECCIÓN ARGÓN

Argon Ar

R-740

CAS: 7440-37-1 EC: 231-147-0

UN: 1006 (Compressed); 1951 (Refrigerated liquid)

ADR Class 2, 1A (Compressed);
3A (Refrigerated liquid)

DOT Class 2.2

Instrument argon 5.0

Impurities [ppm] – Purity $\geq 99.999\%$

| O_2 | N_2 | C_nH_m | H_2O |
|----------|----------|------------|----------|
| ≤ 2 | ≤ 5 | ≤ 0.2 | ≤ 3 |

Scientific argon 6.0

Impurities [ppm] – Purity $\geq 99.9999\%$

| O_2 | N_2 | H_2 | $CO+CO_2$ | C_nH_m | H_2O |
|------------|------------|------------|------------|------------|---------|
| ≤ 0.2 | ≤ 0.4 | ≤ 0.1 | ≤ 0.2 | ≤ 0.1 | < 0.5 |

Typical filling pressure

15 °C: 200 bar(a)

70 °F: 2,640 psi(g)

Characteristics

Colourless and odourless gas. Non-reactive. Inert. Asphyxiant in high concentrations.

Hazard classifications

Proposed by the Industry

Signal word: WARNING

ANEXO E – DETERMINACIÓN DE NÚMERO DE PROBETAS NECESARIAS PARA ENSAYOS DE TRACCIÓN Y DOBLADO, DE ACUERDO A ASME CÓDIGO IX

QW-450 SPECIMENS

QW-451 Procedure Qualification Thickness Limits and Test Specimens

QW-451.1 GROOVE-WELD TENSION TESTS AND TRANSVERSE-BEND TESTS

| Thickness T of Test Coupon, Welded, in. (mm) | Range of Thickness T of Base Metal, Qualified, in. (mm) [Notes (1) and (2)] | | Maximum Thickness t of Deposited Weld Metal, Qualified, in. (mm) [Notes (1) and (2)] | Type and Number of Tests Required (Tension and Guided-Bend Tests) [Note (2)] | | | |
|---|--|--------------------|---|---|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| | Min. | Max. | | Tension, QW-150 | Side Bend, QW-160 | Face Bend, QW-160 | Root Bend, QW-160 |
| | | | | | | | |
| Less than $\frac{1}{16}$ (1.5) | T | $2T$ | $2t$ | 2 | ... | 2 | 2 |
| $\frac{1}{16}$ to $\frac{3}{8}$ (1.5 to 10), incl. | $\frac{1}{16}$ (1.5) | $2T$ | $2t$ | 2 | Note (5) | 2 | 2 |
| Over $\frac{3}{8}$ (10), but less than $\frac{3}{4}$ (19) | $\frac{1}{16}$ (5) | $2T$ | $2t$ | 2 | Note (5) | 2 | 2 |
| $\frac{3}{4}$ (19) to less than $1\frac{1}{2}$ (38) | $\frac{1}{16}$ (5) | $2T$ | $2t$ when $t < \frac{3}{4}$ (19) | 2 [Note (4)] | 4 | ... | ... |
| $\frac{3}{4}$ (19) to less than $1\frac{1}{2}$ (38) | $\frac{1}{16}$ (5) | $2T$ | $2T$ when $t \geq \frac{3}{4}$ (19) | 2 [Note (4)] | 4 | ... | ... |
| $1\frac{1}{2}$ (38) to 6 (150), incl. | $\frac{1}{16}$ (5) | 8 (200) [Note (3)] | $2t$ when $t < \frac{3}{4}$ (19) | 2 [Note (4)] | 4 | ... | ... |
| $1\frac{1}{2}$ (38) to 6 (150), incl. | $\frac{1}{16}$ (5) | 8 (200) [Note (3)] | 8 (200) [Note (3)] when $t \geq \frac{3}{4}$ (19) | 2 [Note (4)] | 4 | ... | ... |
| Over 6 (150) | $\frac{1}{16}$ (5) | $1.33T$ | $2t$ when $t < \frac{3}{4}$ (19) | 2 [Note (4)] | 4 | ... | ... |
| Over 6 (150) | $\frac{1}{16}$ (5) | $1.33T$ | $1.33T$ when $t \geq \frac{3}{4}$ (19) | 2 [Note (4)] | 4 | ... | ... |

NOTES:

(1) The following variables further restrict the limits shown in this table when they are referenced in QW-250 for the process under consideration: QW-403.9, QW-403.10, QW-404.32, and QW-407.4. Also, QW-202.2, QW-202.3, and QW-202.4 provide exemptions that supersede the limits of this table.

(2) For combination of welding procedures, see QW-200.4.

(3) For the SMAW, SAW, GMAW, PAW, and GTAW welding processes only; otherwise per Note (1) or $2T$, or $2t$, whichever is applicable.

(4) See QW-151.1, QW-151.2, and QW-151.3 for details on multiple specimens when coupon thicknesses are over 1 in. (25 mm).

(5) Four side-bend tests may be substituted for the required face- and root-bend tests, when thickness T is $\frac{3}{8}$ in. (10 mm) and over.

ANEXO F – ESCALAS DE MEDICIÓN DE DUREZA, NORMA ASTM E18

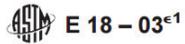


TABLE 5 Rockwell Hardness Scales

| Scale Symbol | Indenter | Total Test Force, kgf | Dial Figures | Typical Applications of Scales |
|--------------|--------------------------|-----------------------|--------------|--|
| B | 1/16-in. (1.588-mm) ball | 100 | red | Copper alloys, soft steels, aluminum alloys, malleable iron, etc. |
| C | diamond | 150 | black | |
| A | diamond | 60 | black | Cemented carbides, thin steel, and shallow case-hardened steel. |
| D | diamond | 100 | black | |
| E | 1/8-in. (3.175-mm) ball | 100 | red | Thin steel and medium case hardened steel, and pearlitic malleable iron. |
| F | 1/16-in. (1.588-mm) ball | 60 | red | |
| G | 1/16-in. (1.588-mm) ball | 150 | red | Cast iron, aluminum and magnesium alloys, bearing metals. |
| | | | | |
| | | | | Annealed copper alloys, thin soft sheet metals. |
| | | | | |
| | | | | Malleable irons, copper-nickel-zinc and cupro-nickel alloys. Upper limit G92 to avoid possible flattening of ball. |
| | | | | |
| H | 1/8-in. (3.175-mm) ball | 60 | red | Aluminum, zinc, lead. |
| K | 1/8-in. (3.175-mm) ball | 150 | red | |
| L | 1/4-in. (6.350-mm) ball | 60 | red | Bearing metals and other very soft or thin materials. Use smallest ball and heaviest load that does not give anvil effect. |
| M | 1/4-in. (6.350-mm) ball | 100 | red | |
| P | 1/4-in. (6.350-mm) ball | 150 | red | |
| R | 1/2-in. (12.70-mm) ball | 60 | red | |
| S | 1/2-in. (12.70-mm) ball | 100 | red | |
| V | 1/2-in. (12.70-mm) ball | 150 | red | |

ANEXO G – TIPOS, MÉTODOS DE APLICACIÓN Y TIEMPOS DE ACTUACIÓN DE LÍQUIDOS PENETRANTES, SEGÚN NORMA ASTM E-165

PÁG. 465

**CLASSIFICATION OF PENETRANT EXAMINATION
TYPES AND METHODS**

Type I – Fluorescent Penetrant Examination

Method A – Water-washable (see Test Method E 1209)

Method B – Post-emulsifiable, lipophilic (see Test Method E 1208)

Method C – Solvent removable (see Test Method E 1219)

Method D – Post-emulsifiable, hydrophilic (see Test Method E 1210)

Type II – Visible Penetrant Examination

Method A – Water-washable (see Test Method E 1418)

Method C – Solvent removable (see Test Method E 1220)

PÁG. 474

RECOMMENDED MINIMUM DWELL TIMES

| Material | Form | Type of Discontinuity | Dwell Times ^A (minutes) | |
|--|---|--|------------------------------------|------------------------|
| | | | Penetrant ^B | Developer ^C |
| Aluminum, magnesium, steel, brass and bronze, titanium and high-temperature alloys | castings and welds | cold shuts, porosity, lack of fusion, cracks (all forms) | 5 | 10 |
| | wrought materials — extrusions, forgings, plate | laps, cracks (all forms) | 10 | 10 |
| Carbide-tipped tools | | lack of fusion, porosity, cracks | 5 | 10 |
| Plastic | all forms | cracks | 5 | 10 |
| Glass | all forms | cracks | 5 | 10 |
| Ceramic | all forms | cracks, porosity | 5 | 10 |

^A For temperature range from 50 to 100°F (10 to 38°C) for fluorescent penetrants and 50 to 125°F (10 to 52°C) for visible penetrant.

^B Maximum penetrant dwell time in accordance with 8.5.2.

^C Development time begins as soon as wet developer coating has dried on surface of parts (recommended minimum). Maximum development time in accordance with 8.8.6.

ANEXO H – INFORME DE RESULTADOS DE ENSAYOS DE TRACCIÓN – LAEV



ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA
MECÁNICA



LABORATORIO DE ANÁLISIS
DE ESFUERZOS Y VIBRACIONES

INFORME TÉCNICO

LAEV – JUL.16.09

Quito, 8 de julio de 2016

TRABAJO SOLICITADO POR: Ing. Diego Espinoza
ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

Los resultados contenidos en el presente informe corresponden a ensayos realizados en probetas de acero pertenecientes a la Srta. Sharon Samantha Abarca Guerrero para el desarrollo del proyecto de titulación "Estudio de la soldabilidad y resistencia mecánica de Al AA6061 y AA6063 sometido a envejecimiento artificial y soldado mediante proceso GMAW". Las probetas fueron entregadas en el Laboratorio de Análisis de Esfuerzos y Vibraciones de la Escuela Politécnica Nacional.

RESULTADOS

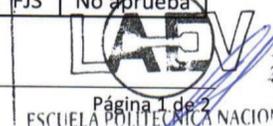
- MUESTRA:** Doce (12) probetas de juntas soldadas de aluminio AA6061 y AA6063 para ensayo de tracción y ocho (8) probetas del material base para ensayo de tracción.
- ENSAYO DE TRACCIÓN A JUNTAS SOLDADAS**

En la tabla 1 se presentan los resultados del ensayo de tracción realizado a las probetas. Las resistencias mínimas a la tracción son: AA6061: 24 ksi (165 MPa), AA6063: 17 ksi (115 Mpa).

Tabla 1. Resistencia a la tracción de las probetas.

| Id. | Ancho promedio | Espesor promedio | Carga máxima registrada | | Resistencia a la tracción | | Obs | Calificación |
|-----------|----------------|------------------|-------------------------|--------|---------------------------|--------|-----|--------------|
| | mm | mm | lbf | N | ksi | MPa | | |
| AA6063-T1 | 23,13 | 2,75 | 1.939 | 8.627 | 19,67 | 135,63 | FMB | Aprueba |
| AA6063-T2 | 20,46 | 2,54 | 1.758 | 7.820 | 21,82 | 150,47 | FMB | Aprueba |
| AA6063-T3 | 21,45 | 2,44 | 1.759 | 7.824 | 21,68 | 149,48 | FMB | Aprueba |
| AA6063-T4 | 21,96 | 2,47 | 1.835 | 8.163 | 21,83 | 150,50 | FMB | Aprueba |
| AA6061-T1 | 21,38 | 3,45 | 2.524 | 11.229 | 22,08 | 152,24 | FJS | No aprueba |
| AA6061-T2 | 20,35 | 3,58 | 2.552 | 11.354 | 22,60 | 155,84 | FJS | No aprueba |
| AA6061-T3 | 23,12 | 4,24 | 1.936 | 8.612 | 12,74 | 87,85 | FJS | No aprueba |
| AA6061-T4 | 20,04 | 4,28 | 2.261 | 10.055 | 17,00 | 117,23 | FJS | No aprueba |
| MIXTO-T1 | 20,62 | 3,43 | 1.541 | 6.855 | 14,06 | 96,92 | FJS | No aprueba |
| MIXTO-T2 | 21,50 | 3,41 | 1.713 | 7.620 | 15,07 | 103,94 | FMB | No aprueba |
| MIXTO-T3 | 20,96 | 3,42 | 1.700 | 7.560 | 15,30 | 105,46 | FMB | No aprueba |
| MIXTO-T4 | 20,24 | 3,45 | 1.581 | 7.030 | 14,60 | 100,68 | FJS | No aprueba |

* FMB: Falla en el material base. *FJS: Falla en junta soldada



3. ENSAYO DE TRACCIÓN A MATERIAL BASE

En la tabla 2 se presentan los resultados del ensayo de tracción realizado a las probetas.

Tabla 2. Resistencia a la tracción, límite de fluencia y elongación de las probetas.

| Id | Ancho promedio | Espesor promedio | Carga máxima registrada | | Límite de fluencia | | Resistencia a la tracción | | % Elongación en 50 mm |
|-----------|----------------|------------------|-------------------------|--------|--------------------|--------|---------------------------|--------|-----------------------|
| | mm | mm | lbf | N | ksi | MPa | ksi | MPa | |
| AA6063-T5 | 20,60 | 2,68 | 2.287 | 10.173 | 22,53 | 155,35 | 26,73 | 184,27 | 13,24 |
| AA6063-T6 | 20,57 | 2,58 | 2.288 | 10.178 | 23,49 | 161,93 | 27,81 | 191,77 | 13,56 |
| AA6063-T7 | 20,77 | 2,61 | 2.398 | 10.668 | 23,66 | 163,15 | 28,54 | 196,79 | 11,72 |
| AA6063-T8 | 20,54 | 2,70 | 2.381 | 10.591 | 23,95 | 165,12 | 27,70 | 190,98 | 10,82 |
| AA6061-T5 | 21,46 | 4,30 | 6.932 | 30.833 | 41,32 | 284,87 | 48,46 | 334,13 | 10,06 |
| AA6061-T6 | 20,97 | 4,29 | 6.156 | 27.382 | 41,06 | 283,13 | 44,15 | 304,38 | 7,32 |
| AA6061-T7 | 20,31 | 4,25 | 6.539 | 29.086 | 41,97 | 289,38 | 48,87 | 336,96 | 11,08 |
| AA6061-T8 | 21,17 | 4,30 | 6.840 | 30.427 | 41,06 | 283,12 | 48,48 | 334,25 | 5,24* |

* Falla fuera de marcas

